

LES INTERACTIONS ENTRE SYSTEME DE TRANSPORT ET SYSTEME DE LOCALISATION EN MILIEU URBAIN ET LEUR MODELISATION

Thèse pour le doctorat de Sciences Economiques Mention Economie des Transports

Présentée et soutenue publiquement par

Sophie MASSON

le 15 décembre 2000

Directeur de Recherche : Professeur Alain BONNAFOUS

Membres du jury : M. Le Professeur Alain BONNAFOUS, Université Lumière Lyon 2, *Directeur de Thèse* M. Le Professeur André de PALMA, Université de Cergy Pontoise, *Rapporteur* M. Le Professeur Bernard FORTIN, Université de Laval (Canada), *Rapporteur* M. Le Professeur François GARDES, Université Paris I M. Le Professeur Jean-Pierre ORFEUIL, Université Paris XII

Table des matières

Remerciements . .	1
Introduction générale . .	3
1. Le contexte de l'évolution du système de déplacements et les enjeux . .	3
11. Les tendances lourdes de l'évolution du système de déplacements . .	4
12. Les enjeux de la maîtrise du système des déplacements urbains .	4
2. Le choix d'une problématique et l'adoption d'une trajectoire particulière de recherche .	5
21. La nécessité d'une gestion globale des déplacements .	5
22. La recherche de nouveaux outils de modélisation . .	7
3. Le plan de la thèse .	8
Chapitre introductif. Evolution de la planification du transport urbain et mutation des modèles de déplacements urbains .	10
Introduction .	10
Section 1. L'évolution du contexte de la planification du transport urbain : une nécessaire mutation des instruments de prévision .	11
Section 2. Les modèles conventionnels à quatre étapes .	20
Section 3. Les modèles désagrégés .	33
Section 4. Des voies de progrès pour la modélisation de la demande de déplacements .	38
Conclusion du chapitre introductif .	44
PARTIE 1. L'analyse des interactions entre système de déplacements et système de localisations .	45
Chapitre 1. Le paradigme de l'analyse de la demande de déplacement .	45
Introduction .	45
Section 1. Le système de transport urbain .	47
Section 2. La demande de déplacement : approche conceptuelle .	51
Section 3. Les fondements théoriques de l'analyse de la demande de déplacement .	60
Section 4. L'analyse des choix de déplacement : la théorie des choix discrets .	75
Conclusion du chapitre 1 . .	96

Chapitre 2. Le lien transport-urbanisation : une revue des approches théoriques .	97
Introduction .	97
Section 1. La notion d'interaction spatiale et les modèles gravitaires .	103
Section 2. La notion d'accessibilité au centre de la relation transport - urbanisation .	119
Section 3. Les modèles de simulation des localisations urbaines . .	130
Section 4. Les enseignements de la micro-économie urbaine .	148
Section 5. Les modèles de choix discrets de localisation fondés sur la théorie de l'utilité aléatoire .	177
Conclusion du chapitre 2 . .	182
Chapitre 3. Les modèles interactifs de transport et d'urbanisation : une revue méthodologique . .	182
Introduction .	182
Section 1. Nécessité et développement des modèles interactifs . .	183
Section 2. Les principes et caractéristiques des modèles interactifs de transport et de localisation .	186
Section 3. Les premiers enseignements et les limites des modèles intégrés .	199
Section 4. Quelques exemples de modèles intégrés . .	217
Conclusion . .	232
PARTIE 2. Développement d'un modèle interactif de déplacements urbains .	233
Chapitre 4. Le contexte et la donne .	233
Introduction .	233
Section 1. Le contexte d'évolution du système de déplacements : l'exemple de l'agglomération lyonnaise .	236
Section 2. Evolution et représentation des formes urbaines : observation sur l'agglomération lyonnaise .	262
Section 3. La méthode de qualification de l'offre de transport . .	272
Conclusion du chapitre 4 . .	294
Chapitre 5. Le modèle, un outil d'aide à la décision stratégique de long terme .	294
Introduction .	294
Section 1. Présentation du modèle .	295
Section 2. Le module de simulation du développement urbain . .	308

Section 3. Le module de répartition des localisations des activités urbaines et des résidents .	320
Section 4. Le module de déplacements . .	331
Section 5. La mise en place des rétroactions dans le modèle . .	372
Conclusion du chapitre 5 . .	375
Chapitre 6. Les simulations du modèle : les avenir possibles des déplacements urbains . .	376
Introduction .	376
Section 1. Les variables d'entrée du modèle et la construction d'un scénario de simulation de référence <i>fil de l'eau</i> .	378
Section 2. La sensibilité des résultats du modèle à quelques variables d'entrée .	394
Section 3. Un scénario volontariste de réduction de la mobilité en voiture particulière : le scénario <i>mobilité durable</i> .	406
Section 4. Un scénario de maîtrise de l'aménagement urbain .	415
Section 5. Un scénario favorable au développement routier . .	420
Conclusion du chapitre 6. Synthèse des résultats et principaux enseignements .	424
Conclusion générale .	435
1. Les objectifs de la recherche .	435
2. La démarche adoptée . .	436
3. Les principaux résultats .	437
4. Les perspectives de recherche . .	440
Références bibliographiques .	445
Annexes . .	459
Annexe 4-1 : La logique du découpage spatial du modèle . .	459
1) Les contraintes d'enquêtes .	459
2) Logique de couronne . .	460
3) Logique de bassins versants . .	461
4) Critères complémentaires .	463
5) Découpage résultant .	464
6) Découpage externe au SDAU . .	465
Annexe 4-2 : « L' enquête ménage » de déplacements : méthodologie et précision	489

statistique .	
1. Le tirage de l'échantillon .	490
2. L'effet de stratification et l'effet de grappe . .	491
Annexe 4-3 : La construction d'un indicateur synthétique des valeurs immobilières .	496
Annexe 5-1: Segmentation des activités économiques .	502
1. La détermination des activités basiques .	502
2. La segmentation des activités induites .	514
Annexe 5-2 : La répartition spatiale des résidents et des activités induites : les tentatives d'ajustement .	516
1. La répartition spatiale des résidents .	516
2. La répartition spatiale des activités induites .	517
Annexe 5-3 : L'algorithme de recherche du plus court chemin . .	528
1. Le problème . .	528
2. Principes des solutions .	529
3. Algorithme de FORD .	529
4. Algorithme d'affectation routière du modèle (adaptation de l'algorithme de Ford) et procédure d'affectation des déplacements en transports collectifs . .	530

Remerciements

Je tiens à remercier tout d'abord Alain BONNAFOUS pour avoir assuré la direction de cette thèse. Je le remercie pour son soutien intellectuel, ses conseils et pour la confiance qu'il m'a accordée.

Je remercie Messieurs André De PALMA et Bernard FORTIN d'avoir accepté d'être rapporteurs de ce travail de thèse.

Je remercie les membres du Laboratoire d'Economie des Transports pour leur soutien chaleureux et, en particulier, Charles RAUX et Jean-Louis ROUTHIER qui m'ont fait partager leur méthode de travail et ont su se rendre disponibles pour répondre à certaines de mes interrogations méthodologiques et techniques.

Je remercie aussi Sandrine DURAND pour sa disponibilité et ses relectures précieuses, pour nos échanges intellectuels et la confrontation de nos travaux et réflexions.

Je tiens à remercier également Eric TABOURIN pour m'avoir accueilli dans son équipe pédagogique et pour la bonne humeur qu'il communique.

Je remercie également Yves CROZET, directeur du Laboratoire d'Economie des Transports, pour m'avoir permis de finir ma thèse dans les meilleures conditions.

Enfin, je tiens à remercier mes proches pour m'avoir soutenue, encouragée et réconfortée dans les moments difficiles, de doute et de remise en cause. Je les remercie également pour leur grande compréhension de mon manque de disponibilité à leur égard.

Introduction générale

Ce travail pose le problème de la planification des déplacements urbains et des outils de modélisation susceptibles d'apporter une aide pertinente à la gestion des systèmes de déplacements urbains à long terme. Il présente une analyse des interactions entre système de transport et système de localisation et en propose une modélisation.

1. Le contexte de l'évolution du système de déplacements et les enjeux

Depuis le début des années 70, dans la plupart des grandes agglomérations, les systèmes de déplacements urbains se caractérisent par une double crise de congestion et de financement. La première est expliquée par le fort développement de la mobilité motorisée, et en particulier la montée des déplacements en voiture particulière. Cette tendance a conduit, dans la plupart des centres des grandes agglomérations, à dégrader les conditions de circulation. En outre, depuis quelques années, les déplacements en automobile se sont fortement développés hors du centre, faisant craindre que le phénomène de congestion ne se généralise aux espaces périphériques urbains. Parallèlement et corrélativement à cette première tendance, une crise du financement des transports urbains s'est manifestée. Cette dernière, concernant d'abord les réseaux de transports collectifs, s'est progressivement étendue à la production de l'ensemble des

infrastructures et des services de transport, dans un contexte de rareté des fonds publics. Les ressources financières limitées des agglomérations entravent tout développement massif de l'offre de transports publics, difficilement rentable. D'autant que, en effet, malgré certains investissements conséquents, la part de marché des modes de transport public décline ou tout au plus se stabilise.

11. Les tendances lourdes de l'évolution du système de déplacements

Des tendances lourdes caractérisent l'évolution du système des déplacements urbains : une croissance de la mobilité qui se porte essentiellement sur l'automobile, le déclin des transports collectifs, l'allongement des distances parcourues, l'éclatement géographique de la distribution des déplacements et le développement de la mobilité non contrainte (augmentation des déplacements pour les affaires personnelles). Le fait qui retiendra le plus notre attention est l'accroissement du rayon quotidien d'action de la mobilité quotidienne. La longueur moyenne des déplacements en automobile dans les grandes villes s'est élevée, passant de 5 à 7 km environ en 10 ans.

L'évolution du système de déplacements est fortement liée aux changements des modes de vie et aux transformations des formes urbaines. En effet, ces dernières décennies sont fortement marquées par le mouvement de périurbanisation : les villes se développent sur des périphéries de plus en plus lointaines. Cette expansion urbaine de l'habitat et des activités pose en des termes nouveaux les relations entre les diverses fonctions constitutives du système urbain dans la mesure où elle s'accompagne d'une reconfiguration des localisations de ces diverses fonctions. Cela entraîne une modification de la géographie des déplacements qui leur sont liés. L'extension du tissu urbain est à l'origine du rayon accru des déplacements, plus particulièrement des migrations alternantes.

Mais réciproquement, ce mouvement d'étalement urbain a été en partie entretenu par l'accroissement des facilités de transport à destination des zones périphériques (diffusion de l'automobile, développement des projets d'investissements routiers, *etc.*). Cette configuration urbaine s'appuie sur l'usage de la voiture particulière pour deux raisons essentielles : d'une part, la voiture particulière est le mode de transport le mieux adapté à ces espaces dont l'urbanisation est diffuse et peu dense, et d'autre part, les transports collectifs sont peu présents ou de qualité médiocre, ceux-ci n'étant efficaces que lorsqu'il est possible de rassembler les usagers jusqu'à une destination commune. L'abaissement des densités urbaines exige et encourage donc la possession et l'utilisation de la voiture particulière et renforce la tendance générale à une augmentation de la part des déplacements en automobile au détriment des autres modes de déplacements.

Ces effets conjoints, et en particulier l'allongement des distances parcourues, conduisent à la nécessité de considérer le système de déplacements dans son inscription spatiale, et de prendre en compte les influences réciproques de l'urbanisation et des déplacements.

12. Les enjeux de la maîtrise du système des déplacements urbains

Les autorités publiques ont tenté dès les années 70 de mieux orienter la demande de déplacements sur les plans modal, spatial et temporel. Le trafic automobile provoque des phénomènes de congestion qui entraînent des dysfonctionnements importants pour lui-même et pour les transports collectifs (vitesse commerciale faible, non respect des fréquences, etc.). L'enjeu majeur de la maîtrise des déplacements urbains réside dans le fait que le système de transport constitue le support de l'activité économique. Le système de transport permet aux individus de se déplacer en vue de réaliser des activités notamment économiques, il permet également la livraison des marchandises dans l'espace urbain. Un système de déplacements urbains inefficace est un risque d'asphyxie pour la ville.

Cela conduit à la nécessité d'une gestion efficace de ce système et à l'établissement ou au maintien de bonnes conditions d'accessibilité aux emplois et aux services, sans que puissent être oubliées les contraintes environnementales et financières. La contrainte d'environnement global implique, dans le cadre d'un principe de précaution, de chercher à réduire les émissions de dioxyde de carbone et donc de la consommation de carburants fossiles issus des transports. La contrainte d'environnement local qui a trait aux émissions locales de polluants atmosphériques et au bruit de la circulation implique que soit envisagé un usage plus rationnel de la voiture particulière. Enfin, les ressources financières limitées des agglomérations entravent tout développement massif des transports publics, aussi bien que des voiries urbaines qui butent quant à elles sur la contrainte précédente.

La conjonction de ces enjeux et contraintes rend ainsi la recherche de solutions plus difficile. « Un équilibre durable entre les besoins en matière de mobilité et de facilité d'accès, d'une part, et la protection de l'environnement et de la santé, d'autre part » doit être assuré (LOTI, article 28, 1982). Dans un tel contexte d'évolution de la mobilité quotidienne, la question de la maîtrise des déplacements urbains devient un véritable défi. Cette maîtrise doit s'appuyer sur une gestion et une planification globale du système des déplacements urbains. Pour ce faire, des outils adaptés de simulation des effets des politiques de transport doivent être construits. L'objectif de notre thèse est alors de proposer un outil de simulation pertinent pour l'orientation de la planification des transports urbains.

2. Le choix d'une problématique et l'adoption d'une trajectoire particulière de recherche

21. La nécessité d'une gestion globale des déplacements

Afin de comprendre le fonctionnement du système des déplacements urbains, ce dernier doit être envisagé comme un sous-système du système urbain. Bonnafous et Puel (1983) définissent le système urbain comme un système complexe résultant de l'imbrication de

trois sous-systèmes :

- Un système de localisation qui correspond à l'utilisation des sols (localisation d'activités et d'habitats, d'équipements publics) ;

- Un système de pratiques et de relations sociales qui désigne le déroulement des activités des citoyens ponctuant l'organisation de la société urbaine ;

- Enfin, un système de déplacements qui articule les deux sous-systèmes précédents et qui regroupe ainsi les flux de personnes et de biens et les infrastructures supportant ces flux.

La demande de déplacements n'est pas une demande immédiate, directe. Les individus ne se déplacent pas dans le but de se mouvoir simplement dans l'espace, ils se déplacent dans le but de réaliser une activité, qu'elle soit économique ou de l'ordre des affaires privées. La mobilité quotidienne est avant tout le résultat de l'inscription dans l'espace et dans le temps de programmes d'activités des individus, elle émane des besoins de réalisation de ces activités.

Cette systémique à trois dimensions soumet l'interprétation d'un phénomène appartenant *a priori* à l'un des trois sous-systèmes à l'analyse des interactions que celui-ci entretient avec les deux autres. Ainsi, afin de rendre compte d'une planification globale du système de déplacements, il faut être conscient du caractère indissociable des deux autres systèmes. En particulier, une démarche de planification globale doit prendre en compte l'interaction du système de transport et du système des localisations urbaines. La question centrale est ainsi celle de l'existence d'interactions potentielles entre le système de transport et le système d'occupation des sols. Il apparaît que les changements que connaissent les villes ont des incidences sur les déplacements et l'offre de transport, lesquels affectent à leur tour la façon dont les villes évoluent. L'évolution future des déplacements doit alors être envisagée en considérant les tendances socio-économiques lourdes affectant la mobilité des agents, le développement des différents réseaux de transport, mais aussi en considérant les rétroactions potentielles sur le système d'occupation des sols.

La mise en évidence de la nécessité de gérer les déplacements sur la base d'une approche systémique et globalisante de l'espace urbain s'est peu à peu imposée. Déjà en 1985, le rapport de la CEMT dirigé par Webster faisait ressortir que « de puissantes forces économiques et sociales sont constamment en jeu, elles produisent des changements du milieu urbain, et il est essentiel que les politiques adoptées permettent dans ce contexte d'atteindre les objectifs fixés. Ainsi, les politiques de transport devraient être considérées dans le cadre de l'aménagement urbain et de la vie économique ; pour élaborer une stratégie globale et cohérente, en matière de transport, il conviendrait de tenir compte de toutes les interactions entre l'aménagement urbain, les transports et l'économie qui ont des effets directs sur les déplacements, notamment de celles susceptibles de produire des effets en retour ». Ce souci s'est progressivement concrétisé

avec la démarche, en France, des Dossiers de Voirie d'Agglomération et celle des PDU qui incite à une coordination de la planification des transports et de la planification urbaine, et à la prise en compte des influences réciproques de l'urbanisation et des déplacements. Le PDU a pour objet de définir les principes généraux de l'organisation des transports, de la circulation et du stationnement, ainsi que les livraisons de marchandises dans le périmètre des transports urbains d'une agglomération. Six objectifs sont fixés par la loi à savoir la diminution du trafic automobile, le développement des transports collectifs et des modes économes et les moins polluants (marche à pied, deux roues), l'aménagement et l'exploitation du réseau principal de voirie, la réorganisation et l'aménagement du stationnement, le transport et la livraison de marchandises, l'encouragement aux entreprises et aux collectivités publiques à favoriser le transport de leurs employés par les transports publics ou le covoiturage.

22. La recherche de nouveaux outils de modélisation

Notre travail de recherche se propose de construire un outil capable d'évaluer, de façon pertinente, les effets de politiques de transport sur le système de déplacements en essayant de dépasser les limites des méthodes usuelles. Les modèles classiques de transports ne considèrent la causalité transport - urbanisation que dans un sens : la répartition de la population et des activités conditionne la formation des déplacements mais la structure urbaine est une donnée sur laquelle ne joue pas l'offre de transport, alors que dans la durée, l'interaction est évidente. Le modèle proposé doit donc pouvoir répondre aux questions suivantes :

Quels sont les effets de mesures de politiques de transport sur le système de déplacements dans une perspective de long terme ? Afin de répondre à cette question, le modèle doit être capable de simuler l'évolution de la masse des déplacements, de leur répartition modale, de leur répartition géographique. L'expérience montre en effet que les investissements en transports collectifs ne sont pas suffisants pour entraîner un report modal de l'automobile vers les transports collectifs : une approche prenant en considération le partage modal et les interactions entre les modes individuels et les modes collectifs (notamment les conflits d'usage sur la voirie) est nécessaire.

L'évolution des formes urbaines ne peut-elle pas remettre en question cette efficacité ? La demande de transport est une demande intermédiaire liée à la réalisation d'activités économiques ou privées. Les pratiques de mobilité sont produites par la distribution des activités sur un territoire. Dans une perspective de long terme, les générateurs de la mobilité peuvent se modifier et transformer la structure des déplacements. Le modèle doit considérer l'impact de la modification des formes urbaines sur la mobilité.

Quel est le rôle du contexte économique dans l'évolution du système des déplacements urbains et donc son poids dans l'efficacité des politiques de maîtrise des déplacements urbains ?

A long terme, quels peuvent être les effets des modifications du système de déplacements sur l'organisation urbaine ? Dans une perspective de long terme, les modifications des conditions de transport peuvent avoir des effets sur les localisations des activités économiques et des localisations des résidents à l'origine de la formation de la demande de déplacements. En effet, les changements des conditions de transport modifient l'accessibilité aux activités urbaines et aux résidents, un des principes directeurs des choix de localisation.

Enfin, dans une perspective de gestion globale, le modèle doit pouvoir simuler un ensemble de politiques stratégiques à l'échelle de l'agglomération.

3. Le plan de la thèse

Notre travail se présente en deux étapes. La première étape propose une investigation théorique sur le fonctionnement du système de déplacements urbains ainsi que sur les mécanismes d'interaction entre système de déplacements et système de localisations. Cette étape a pour objet de fournir les bases à l'élaboration de la structure conceptuelle et théorique du modèle. La seconde étape présente alors la démarche opérationnelle de l'élaboration du modèle.

Après un *chapitre introductif* concernant le comment et le pourquoi de l'évolution de la planification des transports urbains et des outils de modélisation à son service, la première partie de cette thèse a pour objet de présenter les cadres théoriques qui permettent d'appréhender les déplacements urbains, leur insertion dans la ville et les effets de la modification du système de transport sur la structure urbaine. Le *chapitre 1* a comme objectif, dans un premier temps, de caractériser un système de déplacements urbains, de donner une définition et une approche conceptuelle de la demande de déplacements urbains. Dans un deuxième temps, ce chapitre présente les fondements théoriques de l'analyse de la demande de déplacement. Celle-ci se rapproche de la théorie micro-économique du comportement du consommateur et s'en éloigne à certains égards, du fait de ses particularités. *In fine*, l'approche théorique économique la plus aboutie afin d'analyser la demande de déplacement est présentée.

De nombreuses contributions théoriques peuvent alimenter l'étude du rôle du transport sur les choix de localisation et donc de l'analyse de l'interaction transport-urbanisation. Cela fait l'objet du *chapitre 2*. Dans ce chapitre sont présentées, dans un premier temps, deux notions essentielles : celle de l'interaction spatiale, puis celle de l'accessibilité. Dans un second temps, les grandes traditions en termes de modélisation du système urbain sont exposées en insistant sur la façon dont est envisagée l'action du transport sur l'urbanisation. Ces contributions sont de divers ordres. Certaines postulent une causalité quasi mécanique : ce sont les modèles de type gravitaire. D'autres proposent une explication plus économique fondée sur le

comportement rationnel des agents économiques. Pour les auteurs de l'économie urbaine, l'analyse du rôle des transports dans la ville passe par le mécanisme de la rente foncière. Malgré un certain nombre de critiques pouvant leur être adressées, ces modèles présentent un grand intérêt normatif, et sont utiles à la compréhension et à la modélisation des phénomènes.

Le *chapitre 3* est consacré à la présentation de modèles combinant un module de structuration urbaine et un modèle de déplacement. Ces modèles, dits modèles interactifs ou intégrés de transport et d'occupation des sols, ont été fortement développés à l'étranger à partir des années 80. Ces modèles se caractérisent par une grande diversité des bases théoriques et des techniques de modélisation sur lesquelles ils s'appuient. Les résultats d'une étude d'évaluation de ces modèles menée dans les années 80 seront relatés, permettant d'apporter un premier jugement sur leur pertinence.

La deuxième partie de cette thèse est consacrée à la présentation de la démarche empirique c'est-à-dire l'élaboration d'un modèle interactif de simulation de long terme du système de déplacement urbain. Tout travail de modélisation empirique requiert préalablement une phase de constitution de la donnée du modèle. Ce travail, présenté dans le *chapitre 4*, a été relativement laborieux du fait de la diversité des sources de données nécessaires et de leur manque d'homogénéité. Le chapitre 4 est également l'occasion de présenter l'évolution du contexte des déplacements de personnes sur l'aire d'étude retenue, à savoir l'aire métropolitaine lyonnaise. Cet examen permet de mettre en exergue un certain nombre d'invariants et de déterminants.

Le *chapitre 5* présente le modèle de simulation, son architecture générale, sa spécification et son estimation économétrique. L'architecture générale de ce modèle est modulaire, il est composé de plusieurs modules, chacun simulant une phase dans le processus de déplacement. En amont de ce modèle, intervient le module de développement urbain et les modules de répartition spatiale de la population et des activités induites. Les déplacements résultant de l'organisation spatiale des activités urbaines sont modélisés de façon classique en quatre étapes successives : génération, distribution, répartition modale et affectation. L'originalité dans ce modèle est l'introduction de boucles rétroactives produisant la dynamique du système. La confrontation de la structure théorique du modèle et de la donnée est réalisée par des méthodes économétriques, principalement la méthode des moindres carrés ordinaires et celle du maximum de vraisemblance.

Enfin, le *chapitre 6* présente différentes simulations du modèle, caractérisant les avènements possibles du système de déplacements. Dans un premier temps, ce chapitre est l'occasion d'effectuer des tests de sensibilité sur le modèle, ce qui constitue une mise à l'épreuve de la pertinence du modèle. Dans un deuxième temps, il propose l'analyse de simulations de scénarios contrastés dans l'optique d'éclairer le décideur public sur les effets de certaines mesures de transport sur le système de déplacement, étant données certaines hypothèses de développement économique et urbain.

Chapitre introductif. Evolution de la planification du transport urbain et mutation des modèles de déplacements urbains

Introduction

Les planificateurs du transport et les décideurs publics font face à un ensemble de plus en plus important de problèmes. En outre, des préoccupations d'investissement et de congestion, ils doivent intégrer les problèmes de sécurité, d'efficacité du système de transport, d'équité ou d'environnement soutenable. L'élargissement du champ des préoccupations a élevé la complexité de la tâche de la planification de façon significative. Depuis les années soixante-dix, les tendances lourdes caractérisant le système de déplacements urbains sont : une forte croissance de la mobilité qui se porte essentiellement sur l'automobile, le déclin des transports collectifs, l'allongement des distances parcourues. Cependant, le facteur ayant eu à lui seul le plus d'importance sur la structure des déplacements urbains au cours des quarante dernières années a été la très forte multiplication du taux de motorisation et d'utilisation de la voiture. Ces évolutions sont étroitement liées aux changements des modes de vie et aux transformations des formes urbaines. L'incidence du mouvement de périurbanisation sur l'évolution des déplacements a été non négligeable. Parallèlement, ce mouvement a été incité par l'accroissement des facilités de transport à destination des zones périphériques (en raison de la diffusion de l'automobile, du développement d'infrastructures routières de pénétration et de contournement, *etc.*).

Un nombre significatif de recherches a été consacré à l'étude des systèmes de transport urbain ces trente dernières années. La modélisation du transport urbain tient une place importante dans le processus de planification du transport et a connu une évolution continue. Différentes méthodologies de modélisation des transports urbains se sont succédées en parallèle avec les exigences et objectifs de la planification. Chaque type de modèle présente des avantages et des limites particulières. Très tôt, la littérature de la modélisation du transport a été dominée par l'approche dite à quatre étapes. Cette approche était bien adaptée aux préoccupations de la planification des années 50-60, période de forte croissance dans laquelle on ne se souciait pas du problème de la rareté des ressources. Les années de crise de la décennie soixante-dix et suivantes marquent un tournant dans la définition des objectifs de la planification du transport urbain et au même titre conduit à une remise en cause de l'approche standard à quatre étapes. La croissance de la mobilité motorisée trouve ses limites dans les problèmes de congestion principalement corrélés à celui du contexte économique de raréfaction des ressources publiques. Le contexte général est alors marqué par la volonté d'infléchir la croissance explosive de la mobilité individuelle à moindres frais. Cela passe par la nécessité de mieux comprendre les motivations exactes qui président aux choix de déplacement et

donc la nécessité de passer d'une approche descriptive à une approche causale des phénomènes. En termes de modélisation, cela a donné lieu aux modèles comportementaux, ou dits encore « modèles désagrégés ». Cependant, ces modèles ne sont pas bien adaptés aux prévisions à long terme. Or dans les années 80, la planification s'oriente davantage vers des préoccupations stratégiques de long terme et la nécessité de posséder une vision globale du développement urbain. On recherche alors des instruments de modélisation capables de prévoir la demande de transport à long terme (20 à 30 ans). On voit ainsi apparaître le développement des modèles dits stratégiques et le renouveau des modèles intégrés d'urbanisation et de transport.

Un système de transport urbain est un composant de base de l'aire urbaine sociale, économique et de la structure physique. Non seulement la structure et la performance du système de transport fournissent des opportunités à la mobilité, mais sur le long terme, elles influencent les schémas spatiaux de croissance et le niveau de l'activité économique à travers l'accessibilité qu'elles procurent.

La planification doit permettre aux responsables de prévoir et d'accompagner le développement de la ville. Elle doit assurer une cohérence de long terme entre les diverses politiques de la ville. La nécessité de planifier se trouve renforcée par la multiplicité des dysfonctionnements urbains (congestion des centres, dégradation de l'environnement, pollution, déclin de certaines activités économiques).

Dans un premier temps, un rappel sur l'évolution du contexte de la planification des transports urbains et ses conséquences sur la définition des instruments de simulation seront présentées. Par la suite, la méthodologie des modèles qui ont marqué et qui marquent encore la planification des transports urbains, à savoir les modèles à quatre étapes et les modèles dits désagrégés, sera exposée en insistant sur les limites que posent ces approches. Partant, les voies d'amélioration et de recherche d'une plus grande pertinence des modèles seront examinées.

Section 1. L'évolution du contexte de la planification du transport urbain : une nécessaire mutation des instruments de prévision

La planification des transports urbains a connu différentes phases associées à des objectifs différents. Cela a eu des répercussions sur la pertinence des modèles utilisés¹.

11. Définition du processus de la planification

Les transports, s'ils ne doivent pas être considérés comme une fin en soi, ne présentent pas moins un caractère stratégique dans le développement d'une agglomération. Les choix en matière de transport auront donc des conséquences importantes sur de nombreux aspects économiques et sociaux de la vie quotidienne. Les responsables des transports urbains, confrontés à un ensemble d'alternatives devront tenir compte des autres éléments qui composent le développement d'une agglomération. Le nombre et la nature des alternatives qu'ils s'efforceront de considérer pourront varier fortement selon

¹ Cette rétrospective de la planification et des outils de simulation associés s'appuie sur les travaux de recherche de Le Nir (1991).

les spécificités de la ville et les différents horizons d'étude retenus. La planification doit alors permettre d'établir une hiérarchie entre les variantes proposées en éliminant celles dont la viabilité peut être remise en cause. La complexité des enjeux techniques et financiers et les arbitrages entre les intérêts contradictoires expliquent le besoin de recourir à des études. Celles-ci doivent permettre de mesurer les implications attendues du projet sur le réseau existant, mais également sur l'ensemble du tissu urbain. L'étude ne peut être définie qu'en fonction de l'objectif de la planification. Les mesures de planification, qui donnent un cadre global à l'orientation du développement du système de transport, doivent être guidées par un ou des objectifs à atteindre. Il peut s'agir de la volonté de rendre le trafic plus fluide, d'augmenter la vitesse de circulation, ou bien de réduire la circulation routière et ses effets externes ; ou d'un objectif plus global consistant à réguler l'ensemble du système des transports en harmonie avec l'urbanisation. Les études de planification se définissent également par le terme de l'étude. Le choix de l'horizon d'étude joue un rôle essentiel. Merlin (1984) rappelle à ce propos que de nombreux projets s'inscrivent dans le long terme à la fois parce que la mise en service des infrastructures à l'horizon d'étude ne pourra être effective que quelques années plus tard, mais également parce que certaines infrastructures devront être utilisées pendant plusieurs décennies, voire plusieurs siècles. Néanmoins, trois horizons d'étude sont en général distingués : le court terme qui s'adresse aux études n'excédant pas cinq ans ; le moyen terme pour les études dont la durée est comprise entre 5 et 10 ans ; le long terme qui s'applique à des études dont la durée peut être supérieure à 10 ans. Les études à court terme considèrent souvent une infrastructure comme donnée et se focalisent davantage sur les mesures d'exploitation ou la connaissance fine des déplacements ou des usagers. Les études à moyen terme ont également pour objectif des analyses assez fines comme la valorisation par l'urbanisation des décisions de transport le long d'axes d'urbanisation particulièrement importants. Les études à long terme souffrent en revanche de l'éloignement entre la situation de référence et l'horizon d'étude. Elles reposent de ce fait sur des hypothèses de travail fragiles. Les incertitudes liées aux résultats qu'elles fournissent sont accrues en raison de difficultés plus grandes à maîtriser les évolutions de l'urbanisme, des activités ou des comportements de déplacements. L'intérêt des études à long terme, malgré la précarité de certaines hypothèses sur lesquelles elles reposent, ne doivent pas être négligées. Ce sont elles qui permettent de s'assurer qu'il existe une cohérence entre le système de transport retenu et le développement urbain envisagé (Le Nir, 1991).

L'échelle de l'étude est également importante. En effet, le périmètre concerné peut très bien recouvrir une micro-zone, au niveau du quartier, qu'une aire métropolitaine dans son ensemble. Selon l'échelle retenue, il sera plus ou moins facile de mener une étude désagrégée, de fournir des résultats à un niveau fin de détail.

Les études peuvent faire appel à différents moyens. Néanmoins, la modélisation est l'instrument privilégié de la planification des transports. Les modèles constituent en effet des instruments particulièrement adaptés aux problèmes rencontrés en économie des transports où leurs applications sont nombreuses et variées.

12. L'évolution de la planification des transports urbains et de ses

instruments

Depuis quarante ans, le contexte des villes et des systèmes de transport s'est modifié, ce qui a conduit à redéfinir les objectifs de la planification des transports urbains.

121. Les années soixante : une planification à long terme et au service de l'automobile

1211. Le contexte : forte expansion économique et priorité au transport routier

Les années 50 et 60 sont marquées par une forte expansion économique, et le développement de technologies nouvelles. Le niveau de vie des ménages s'élève, l'usage de la voiture se démocratise. En outre, le secteur de la construction automobile devient un des fers de lance du développement de l'activité économique et est porté par les politiques gouvernementales. La France enregistre, après la seconde guerre mondiale, une croissance importante du parc automobile, une croissance favorisée par une élévation progressive du revenu des ménages. De nombreux problèmes de congestion vont apparaître principalement aux entrées et aux sorties des grandes agglomérations. Cela n'infléchit cependant pas les choix politiques de l'époque. Au contraire, les principaux décideurs s'efforceront de doter la France d'un réseau routier compatible avec un accroissement constant du parc automobile. La création en 1951 du Fonds Spécial d'Investissements Routiers (FSIR) conçu pour financer les principales réalisations routières sur la base d'un financement basé sur les taxes grevant les carburants, confirme cette tendance. Une volonté politique d'assujettir les investissements routiers aux nécessités de l'industrie automobile se fait jour. Par ailleurs, les investissements devenant de plus en plus importants, leur contrôle se révèle incontournable.

La volonté politique affichée de développer la voiture particulière a fortement déterminé la problématique des études. Les besoins en transport dans la plupart des grandes villes étaient interprétés comme la nécessaire augmentation des capacités autoroutières et routières afin de répondre à une augmentation de la demande de mobilité en voiture particulière. Les premières études de transport se sont développées, en France comme à l'étranger, en réponse aux nombreux problèmes qui tendaient à l'époque à se multiplier : problèmes de sécurité, gestion difficile à plusieurs vitesses et surtout problèmes de congestion dans les centres urbains et aux entrées des agglomérations. Les solutions qui s'imposaient à l'époque reposaient essentiellement sur un élargissement des voies ou la réalisation de rocade de contournement. Le coût représenté par l'élaboration de telles infrastructures pour la collectivité étant loin d'être négligeable, il apparaissait utile, voire indispensable de cerner au mieux les besoins des différentes agglomérations et de définir ainsi les principales priorités. Les responsables ont cherché avant tout à répondre *a posteriori* à une augmentation du volume de déplacements en mettant en oeuvre des infrastructures qu'il convenait de justifier rationnellement.

Les années 50 ont été marquées par l'introduction de nouveaux outils qui ont permis à la France de se doter de multiples bases de données. Ces bases de données vont être

à l'origine de la profusion de modèles de prévision de trafic tout au long des années 1960. L'essor de ces modèles souligne à la fois une prise de conscience de phénomènes spécifiquement urbains et confirme la tendance des responsables français à s'appuyer sur une technicité américaine qui a déjà fait ses preuves.

1212. Les techniques de planification : la prédominance des modèles agrégés à quatre étapes

La méthode des facteurs de croissance a été une des premières techniques de modélisation utilisée. Cette méthode est fondée sur un principe simple : le trafic futur est proportionnel au trafic actuel. La plupart des méthodes de facteurs de croissance reviennent à établir une simple extrapolation linéaire du trafic existant à partir de l'accroissement prévu de variables caractéristiques des zones d'origine et de destination. Pour cela, elles nécessitent un recours à des méthodes d'itération plus ou moins lourdes. La principale critique qui leur sera faite, hormis le fait que ces modèles se contentent de multiplier les trafics déjà existants, est qu'ils ne sont réellement opérationnels qu'à court ou moyen terme. C'est-à-dire pendant une période au cours de laquelle la ville ne risque pas d'être affectée par des changements structurels pouvant remettre en cause la valeur des coefficients établis. Ces premiers modèles vont par la suite subir plusieurs modifications importantes qui conduiront petit à petit à une redéfinition de la problématique de la prévision.

La prise en compte du long terme apparaît comme la plus importante. Elle est la conséquence logique d'effets provoqués par une croissance régulière de l'urbanisme, mais également de l'industrie automobile. Ces évolutions conjuguées ont des implications considérables sur la structure même des déplacements. Elles rendent de ce fait quasiment incontournable la considération d'un horizon plus éloigné que ceux qui étaient jusqu'alors considérés. La remise en cause des horizons de court et moyen terme va également contribuer à développer la notion de réseau par opposition aux études se limitant à un axe particulier. La principale conséquence de ces changements intervenus dans la modélisation des transports va consister en une distinction entre la phase de prévision du nombre de déplacements émis ou reçus dans une zone et la répartition de ces déplacements en volume entre les différentes zones. Plus tard, la méthode de prévision généralisée développée aux Etats-Unis est adoptée en France. Il s'agit des modèles classiques à quatre étapes officialisés en 1956 par *le Federal Highway Act* (Le Nir, 1991). Les principes des modèles classiques à quatre étapes et leurs limites méthodologiques seront présentés par la suite en section 2. Cette méthode débouche sur l'enrichissement du noyau dur « génération - distribution » de la problématique par l'élaboration de deux phases supplémentaires : la répartition modale et l'affectation. Cependant, il faut souligner que s'il s'agit des premières techniques de modélisation réellement abouties, d'autres instruments d'études les ont néanmoins précédés².

La phase de répartition modale prend des caractéristiques bien différentes des modèles de choix modal développés par la suite. A cette époque, les transports collectifs offraient une qualité de service médiocre et leur développement n'était pas une priorité. Les études se concentraient sur le problème de la voiture particulière qui constituait le seul mode dont l'emploi nécessitait des investissements routiers revêtant une importance

aux yeux des responsables. La répartition modale permettait alors simplement de séparer la part résiduelle des déplacements effectués grâce à un mode autre que l'automobile.

Le recours de plus en plus systématique à des procédures informatisées allait en outre faciliter l'apparition d'une étape supplémentaire : l'affectation. Les modèles d'affectation ont pour tâche d'estimer la répartition des déplacements sur les diverses composantes d'un réseau de transport. Ce réseau est constitué par un ensemble de liens qui possèdent pour la plupart un sens de circulation et dont les intersections sont représentées par des noeuds. A chaque lien est affectée une fonction d'impédance, laquelle tient compte du niveau de service offert (longueur, nombre de voies de circulation, temps de recherche de stationnement ou coût du péage pour les automobiles, temps d'attente et de correspondance pour les transports collectifs, temps de parcours, coûts, confort). Elle se traduit par une distance ou un temps de parcours. Les déplacements estimés pour chaque couple O-D selon un mode donné sont ainsi affectés aux tronçons d'un ou de plusieurs itinéraires susceptibles d'être empruntés. La plupart de ces modèles d'affectation repose sur la théorie des graphes et font appel aux différents algorithmes qui relèvent de celle-ci. Il existe plusieurs méthodes d'affectation mais il est intéressant de souligner que quelle que soit la méthode retenue, la phase d'affectation appelle plusieurs remarques importantes. Tout d'abord, sa prise en compte confirme la volonté de la part des responsables de penser le transport urbain en termes de réseau et non plus uniquement en termes d'infrastructure isolée. D'une part, l'importance du temps témoigne d'un désir de favoriser des politiques fondées sur une production de voiries nouvelles synonyme de vitesses supérieures. Enfin, comme le souligne Dupuy, l'évolution de la problématique sur laquelle a été fondée les modèles de trafic américains rend bien compte du contexte particulier du développement massif de l'industrie automobile. Elle a conduit ce pays à des investissements routiers sans précédents qui constituaient un moyen considérable pour développer la circulation automobile. Cette évolution dénote également un certain aspect planificateur dans la mesure où elle témoigne des efforts de concilier des logiques nationales de développement du marché automobile et de grands travaux avec une logique de viabilité d'un système urbain propre à assurer le transport des personnes et le financement local des investissements.

Cependant, un certain désenchantement par rapport à ce type de planification s'est progressivement manifesté. De tels plans étaient perçus comme inadaptes aux objectifs

² Les premiers instruments dont se dotèrent les responsables leur permirent de réaliser les premiers comptages. Dupuy a démontré que ces techniques de mesures souffraient d'une insuffisante maîtrise du trafic de transit. La résultante de ce constat est que les responsables préconisaient systématiquement des solutions visant à un élargissement de la voirie. Ces premiers résultats vont peu à peu s'affiner et les Etats-Unis vont voir fleurir au cours des années 30, les premières enquêtes cordon. Par la suite, des progrès remarquables dans le domaine des études de transport sont enregistrés aux Etats-Unis : il s'agit du développement de nombreuses enquêtes dont l'objet principal consiste à distinguer l'origine et la destination des voitures particulières. Parmi les nombreux avantages présentés par les enquêtes O-D, deux éléments vont se révéler d'un intérêt tout particulier pour la suite des études : la connaissance du motif de déplacement et la période durant laquelle ce déplacement a été effectué. La multiplication de ce type d'enquêtes si elle tend à révéler une grande variété des types de déplacements soulignera également la prédominance des déplacements domicile-travail. La plupart des outils mis en oeuvre jusque-là permettent de répondre à des problèmes ponctuels en offrant des solutions relevant davantage d'une logique de court terme. Ces solutions sont apparues toutefois limitées devant l'ampleur du développement de l'automobile.

des décideurs et de façon générale étaient considérés comme irresponsables, myopes par rapport aux besoins sociétaux. L'insatisfaction par rapport aux résultats de ces études a généré un débat sur les hypothèses implicites utilisées dans l'approche analytique.

122. Le retournement des années soixante-dix

1221. Le contexte : retournement de la croissance économique, raréfaction des ressources publiques et développement des externalités du trafic routier

Les politiques de transport urbain des années 60 et début 70 ont été essentiellement fondées sur des stratégies d'investissement. Durant cette période, les responsables se sont efforcés de rattraper le retard français en équipements, puis de répondre à l'explosion des déplacements en voiture particulière grâce à une politique d'investissement volontariste. Le développement de l'urbanisation et de la mobilité au cours des années 60 pouvait laisser présager une période de forte croissance. C'est dans ce cadre que fut votée le 30 décembre 1967 la LOF (Loi d'Orientation Foncière). La planification s'appuyait à l'époque sur l'élaboration de schémas d'aménagement et d'urbanisme (SDAU)³. Ces schémas de planification s'appuyaient sur des études de prévision du développement urbain consistant principalement en des projections de tendances de l'urbanisation. Cette méthodologie s'est heurtée à certains problèmes, révélant le caractère peu fiable des projections sur lesquels se fondaient les SDAU. La croissance urbaine des villes centres a, en effet, enregistré un certain ralentissement provoqué, entre autres, par une multiplication des difficultés de circulation, auxquelles s'ajouteront de nombreux effets négatifs comme le bruit, la pollution et surtout des difficultés croissantes de stationnement. Celles-ci vont entraîner une délocalisation de nombreuses activités, qui à l'image des commerces, vont s'installer en périphérie. Par ailleurs, c'est au milieu des années 70 que l'on commence à observer les effets de masse du phénomène de périurbanisation : les ménages quittent la ville-centre pour s'installer en périphérie.

En outre, le retournement de la croissance économique, la raréfaction des ressources publiques, la dégradation des conditions de circulation et les nombreuses impasses théoriques dans lesquelles se sont trouvés les modèles de trafic, ont contribué à une remise en cause de certaines pratiques de planification. Cette remise en cause des outils conventionnels ne s'est pas traduite par un abandon des instruments utilisés jusque-là, mais par une nouvelle définition de leur champ d'étude. Cette période est marquée par une volonté d'infléchir la croissance explosive de la mobilité motorisée individuelle. Il s'agit alors de comprendre quelles sont les motivations exactes qui président aux choix de déplacement des individus et d'évaluer les conséquences d'une mesure ponctuelle de court terme.

³ Le SDAU est un plan à long terme qui formalise de façon grossière le futur de la ville. Il fixe les principales options qui seront retenues pour l'avenir en matière d'aménagement et d'urbanisme. Il est également chargé d'établir l'organisation générale des transports avec en particulier la détermination des infrastructures nouvelles à un horizon de moyen et long terme. Il prévoit à cet effet la constitution des plans d'occupation des sols (Le Nir, 1991).

En matière de politiques adoptées, les grands projets d'investissements font place à des stratégies moins coûteuses, visant à réguler le trafic plutôt qu'à offrir de nouvelles capacités. Les plans de circulation deviennent le principal moyen de revitalisation des centres. En outre, la planification des transports collectifs est relancée au milieu des années 60 avec la remise en cause de la politique fondée sur le « tout automobile ».

1222. Les techniques de planification : la recherche de modèles explicatifs

Sous ces changements, la problématique de l'analyse et de la prévision de la demande de transport se voit alors modifiée. En réaction aux critiques adressées aux modèles conventionnels à quatre étapes sur la faiblesse de leur pouvoir explicatif, les méthodes développées visent à acquérir un niveau explicatif supérieur. Deux courants majeurs se développent alors. Le premier est relatif aux « modèles basés sur les activités » (*activity-based models*) qui non seulement prennent en compte les contraintes spatiales et temporelles des comportements, mais supposent également que les déplacements sont intimement liés à l'accomplissement d'un programme personnel d'activités. Le deuxième courant est celui des modèles de choix discrets ou modèles désagrégés qui se focalisent sur le concept de déplacement comme le résultat d'un processus de choix d'un décideur qui choisit d'effectuer une action particulière parmi un ensemble d'actions potentielles. L'approche désagrégée s'applique à la représentation de choix discrets : un agent n , confronté à un ensemble fini d'éventualités i , doit faire une sélection en fonction de ses propres caractéristiques ou aspirations, et des attributs de chaque modalité de son univers de choix. Les principes de cette approche et ses limites seront plus largement présentés en section 3.

123. Les années quatre-vingts : la nécessité d'une approche stratégique

L'accent a été mis dans les années 50-60 sur les investissements à long terme et les modèles ont été orientés dans ce sens. Il est apparu progressivement que les modèles de prévision à long terme présentaient de graves insuffisances, et qu'ils s'avéraient incapables d'établir à long terme une prévision valable des structures de comportements. De ce fait, les responsables ont pris conscience qu'il était dangereux d'arrêter définitivement et une fois pour toute des plans et des investissements à long terme. Dans les années soixante-dix, on a privilégié une programmation flexible des investissements et une remise en cause de la pertinence de la prévision à long terme. Cependant, une telle méfiance à l'égard de la prévision à long terme a, par réaction, conduit l'économétrie à un mouvement qui privilégie le court terme, se concentrant par exemple sur les phénomènes de congestion, de nuisances, etc. En conséquence, l'analyse a eu de plus en plus tendance à prendre pour point de départ la demande telle qu'elle s'exprime sur le marché et à utiliser des simulations économétriques simples et à très court terme. Les simulations de ce type sont certes très intéressantes par leurs résultats, mais ne sauraient faire oublier qu'il est dangereux d'utiliser des modèles à très court terme, si l'on ne possède aucune information sur le long terme. Il est indéniable que dans un processus continu et adaptatif de planification, les décisions périodiques, même présentant un caractère à court terme, ont nécessairement des impacts à long terme et sont influencées par le long terme. Il est alors apparu indispensable, notamment en fonction de la prise de conscience

croissante des effets externes générés, que toute approche se devait d'avoir au moins une perspective à long terme.

1231. Le contexte : la prise en compte des effets de long terme et une volonté politique croissante d'intégration des politiques de transport et d'urbanisation

Il est apparu au cours de la décennie 80 que pour que les transports fonctionnent de manière satisfaisante sur le plan tant opérationnel que financier, l'inscription des politiques de transports urbains dans une stratégie cohérente était indispensable afin que ces politiques n'aient pas pour effet de s'annuler mutuellement et ce de façon peut être coûteuse. « De puissantes forces économiques et sociales sont constamment en jeu qui produisent des changements du milieu urbain, et il est essentiel que les politiques adoptées permettent dans ce contexte d'atteindre les objectifs fixés. Ainsi, les politiques de transport devraient être considérées dans le cadre de l'aménagement urbain et de la vie économique. Pour élaborer une stratégie globale et cohérente en matière de transport, il conviendrait de tenir compte de toutes les interactions entre l'aménagement urbain, les transports et l'économie qui ont des effets directs sur les déplacements, notamment de celles susceptibles de produire des effets en retour » (Webster, 1985). Les changements que connaissent les villes ont d'importantes incidences sur les déplacements et l'offre de transport, lesquels affectent à leur tour la façon dont les villes évoluent. Il est donc essentiel, lorsque l'on tente de prévoir la structure future des déplacements, de tenir pleinement compte des changements qui interviennent dans les structures urbaines. Le fait de considérer isolément les politiques d'utilisation du sol et de transport et de n'adopter qu'une approche à court terme a eu tendance à entraîner d'importantes variations dans les politiques pratiquées par de nombreux pays au cours des trente dernières années. Webster souligne à ce propos (1985) : « les politiques de transport donneront sans doute de meilleurs résultats si elles sont considérées dans le cadre de l'aménagement urbain et de la vie économique, en tenant compte de leurs incidences à long terme, et de leurs effets possibles en retour ». Il est donc indispensable que les politiques urbaines adoptées soient pensées et s'inscrivent dans une stratégie globale cohérente afin de pouvoir atteindre leurs objectifs. En outre, au début des années 80, le rapport initié par le comité des transports urbains de la CEMT (Bly, Webster, Pounds, 1980) abouti à la conclusion suivante : « il a été considéré comme essentiel de considérer le problème des transports urbains comme un tout. En effet, l'utilisation d'un mode dépend de la qualité et de l'accessibilité de chacun des autres modes ainsi que de l'adaptabilité relative de chaque mode au contexte urbain spécifique dans lequel il se trouve. En outre, l'évolution de la structure urbaine elle-même dépend des transports ».

Ainsi, c'est une approche stratégique qui est prônée et la prise en compte des effets de long terme s'inscrivant dans une préoccupation du développement durable de la ville. Cependant, la prise en considération de la dimension de long terme entraîne des précautions non négligeables dans la méthodologie de la planification adoptée. La table ronde de la CEMT en 1976 soulignait que « pour cette connaissance du long terme, force est de reconnaître qu'il faut rester modeste, dans l'état actuel des connaissances, on ne peut en effet attendre d'un modèle à long terme une précision importante. Dans ces

conditions, pour mener une analyse pertinente, ce qu'il convient de développer, ce sont des modèles explicatifs de définition de l'impossible, capables de révéler l'irréalisable et les situations de blocage ».

En matière de modélisation, cette nouvelle problématique donne lieu au développement des modèles dits stratégiques et donne un nouveau souffle aux modèles interactifs de transport et d'urbanisation.

1232. Les outils de planification

Deux courants majeurs, de la même veine, répondent à cette problématique. Il s'agit des modèles de déplacements urbains dits stratégiques et des modèles interactifs de transport et d'urbanisation. Ces deux approches sont de nature stratégique, c'est-à-dire que ces types de modèles peuvent aider à déterminer les effets au niveau d'une agglomération d'un ensemble d'options de politiques d'investissement, de tarification, de mesures de régulation du système de transport.

Un certain nombre de caractéristiques sont souhaitables dans le cadre d'une perspective stratégique. En particulier, le modèle doit :

1.
Opérer à un niveau spatialement agrégé. Les modèles fondés sur une agrégation zonale présente un moyen utile de simplification d'un système de transport complexe. Cette simplification permet aux planificateurs des transports et aux décideurs politiques de se concentrer sur les problèmes de transport urbain à un niveau plus large, plus stratégique.
2.
Ces modèles doivent avoir la capacité de prévoir la demande de transport à long terme (20 à 30 ans). La planification stratégique requiert une vision mesurée davantage en décennie plutôt qu'en année.
3.
Ces modèles doivent être capables d'expliquer les changements à long terme des schémas d'usage des sols. Ceci permet l'exploration des options de politiques d'urbanisation comme un moyen de faire face aux problèmes des transports.
4.
Ces modèles doivent permettre de prendre en compte l'interaction transport-urbanisation. Un manquement à cette tâche peut sérieusement saper la justesse et la crédibilité des prévisions faites par le modèle.
5.
Ces modèles doivent être capables de représenter la concurrence entre les différents modes de transport. Le problème du choix du mode a, en effet, toujours été un élément important de la planification du transport et de la décision politique.

Après avoir rappelé l'évolution de la planification des transports urbains et ainsi donné un cadre contextualisé à l'élaboration de notre modèle, nous allons à présent présenter la

méthodologie des modèles classiques afin de mieux comprendre pourquoi ceux-ci ont été l'objet d'un tel rejet. Nous présenterons dans un premier temps les grands principes présidant leur élaboration, puis dans un second temps examinerons les limites de ces modèles. Cette section sera suivie par la présentation des modèles alternatifs qui ont succédé à ces modèles traditionnels. Ainsi, les modèles dits désagrégés seront brièvement exposés, puis les modèles stratégiques.

Section 2. Les modèles conventionnels à quatre étapes

La « méthode classique » a été mise au point, dans ses grandes lignes, entre 1960 et 1965. C'est à cette époque que l'on est sorti des modèles frustes (facteurs de croissance, courbes empiriques de répartition entre modes de transport, affectation par « tout ou rien ») et que l'on a, en quelques années, mis au point : les grands modèles de distribution géographique (gravitaires, opportunités) ; les principales méthodes d'analyse du choix modal ; les concepts de coût généralisé d'un déplacement. La véritable percée méthodologique au début des années soixante, dans le domaine de la planification des transports urbains, tient à plusieurs causes qui se sont trouvées réunies : la volonté, aux Etats-Unis surtout, mais aussi en Europe, de construire massivement des autoroutes urbaines, sous la pression du « lobby » de l'automobile ; le développement des méthodes d'analyse (recherche opérationnelle) et de calculs (gros ordinateur) ; la confiance dans la croissance aussi bien démographique qu'économique. Ces outils ont été orientés vers les problèmes des flux de trafic automobile, en mettant l'accent sur des déterminants démographiques et de réseau de la demande de déplacement plutôt que sur les réponses comportementales.

21. Les principes et caractéristiques des modèles classiques

On compte de nombreuses études de développement des modèles de la méthode classique, toutes différentes en termes d'objectifs et dans leurs détails. Du fait de cette prolifération, il est impossible d'être complet sans risquer de trop généraliser cette approche. Il est utile, cependant, d'essayer de dégager les principales caractéristiques de ces modèles, même s'il peut avoir quelques exceptions à la description très générale établie sur ceux-ci.

Les modèles conventionnels de demande de déplacements urbains développés en France se fondent sur la transposition de la méthode d'analyse UTP (Urban Transport Planning) développée aux Etats-Unis. Cette procédure divise la fonction de demande en déplacements émis et attirés, en distribution de déplacements, en répartition modale et en affectation sur itinéraire. Les unités d'observations sont les zones de l'aire d'étude. La structure standard de ces modèles peut être schématisée selon la figure suivante. Elle est composée de quatre sous-modèles de génération, distribution zonale, répartition modale et affectation.

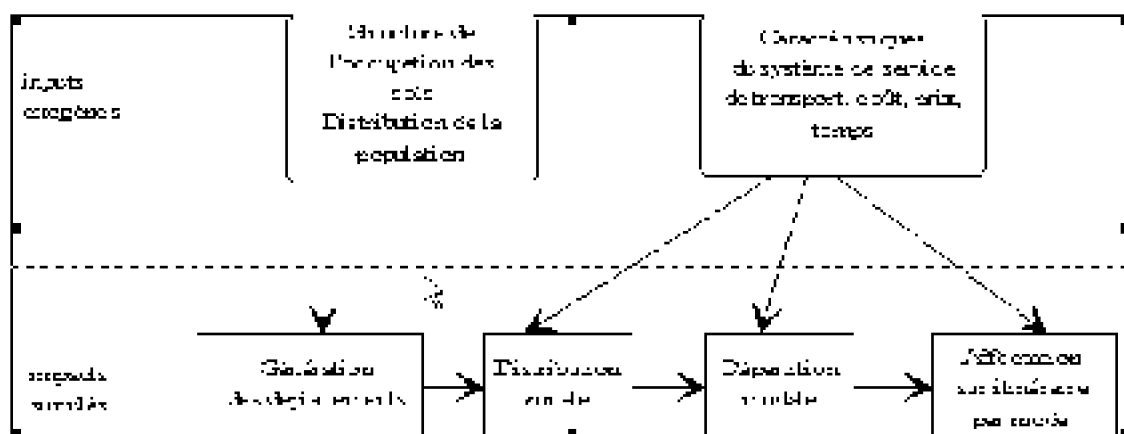


Figure 0-1. Structure standard des modèles conventionnels de déplacements urbains

211. L'étape de génération

Le but de la modélisation de la génération des déplacements est de déterminer le niveau de demande agrégée pour les déplacements en origine et en destination de chaque zone de l'aire d'étude. Ceci est réalisé par motif de déplacement. Il est usuellement supposé que les déplacements émis ou reçus sont déterminés uniquement par des facteurs exogènes et plus particulièrement par les caractéristiques socio-économiques de la zone d'émission ou d'attraction respectivement. Les équations peuvent alors être écrites simplement de la façon suivante :

$$T_i = f(S_i) \quad (0-1)$$

$$T_j = f(S_j) \quad (0-2)$$

où T_i et T_j représentent les trafics émis par zone i et les trafics attirés par la zone j respectivement ; et S_i et S_j sont des caractéristiques socio-économiques ou d'urbanisation concernant les zones i et j . Les variables de transport ne sont généralement pas introduites dans ces modèles, ainsi ils posent l'hypothèse que la fréquence de déplacement est totalement indépendante des changements dans le système de transport. Les modules de génération ne sont donc pas adaptés pour tester des politiques de transport puisqu'aucune variable représentative de quelque mesure de transport n'est introduite. Cela implique qu'aucun changement sur le système de transport occasionné par une mesure politique ne pourra avoir d'effets sur la fréquence des déplacements. Dans l'optique de rectifier cela, certains modèles ont introduit des variables d'accessibilité généralisée dans les équations de génération de déplacements. La représentation de la génération des déplacements par zone peut être fondée sur des moyennes zonales ou des totaux. Le modèle n'est ni comportemental, ni causal puisqu'il ne présente pas les décisions des personnes confrontées au choix de leur fréquence de déplacement. Les méthodes de régression simples ou multi-linéaires sont fréquemment utilisées pour estimer ce sous-modèle.

212. L'étape de distribution géographique des déplacements

L'objectif de la modélisation de la distribution des déplacements est de distribuer le nombre total des déplacements en origine de chaque zone parmi toutes les zones de destination possibles. Les entrées du modèle sont les volumes d'émission et d'attraction des déplacements par zone estimés dans la phase précédente, en relation avec des caractéristiques du service offert par le système de transport entre les deux zones. La matrice de distribution des déplacements peut être désagrégée par motif de déplacement et selon l'heure de la journée (heure de pointe ou hors pointe). Le modèle de distribution des déplacements peut être exprimé dans sa forme générale comme suit :

$$T_{ij} = f(T_i, T_j, F_{ij}) \quad (0-1)$$

où T_{ij} est le trafic de i à j , et F_{ij} est la fonction d'impédance de déplacement entre i et j , pouvant être définie en fonction de la distance séparant i et j , du temps de parcours moyen, du coût de transport ou d'une combinaison de ces éléments.

Ce processus de distribution est plus descriptif que causal dans la mesure où il ne prévoit pas la distribution des déplacements issue des conditions d'un nouvel équilibre qui prévaudrait si le système de transport est changé. La spécification fonctionnelle utilisée communément dans cette étude est le modèle gravitaire (ces modèles seront plus présentés dans le chapitre 3). Ces modèles stipulent que les déplacements de la zone i à la zone j sont considérés comme étant le produit du total des déplacements émis par la zone i et du total de déplacements attirés dans la zone j , et en relation inverse avec une fonction de la qualité de service du transport entre les deux zones. Des contraintes linéaires assurent que les sommes des marges de la matrice résultante soient cohérentes avec les émissions et les attractions données, et une procédure itérative peut être utilisée afin d'atteindre cette cohérence interne. Le modèle a de faibles justifications théoriques, bien que Wilson (1970) ait utilisé les mathématiques des mécanismes statistiques qui concernent les comportements agrégés des molécules où chaque mouvement est aléatoire, afin de montrer que certaines catégories de modèles gravitaires pouvaient fournir une bonne représentation des comportements agrégés des voyageurs (Cf. Chapitre 3).

213. L'étape de répartition modale

Le module de partage modal est certainement celui qui est le plus diversifié dans la pratique. Ce module alloue les déplacements pour chaque paire de zone entre les moyens de transport disponibles. Cependant, la diversité des modes est souvent ignorée ou appréhendée grossièrement en combinant tous les modes en deux modes dichotomiques. Plus communément, seulement deux modes de transport sont considérés : la voiture particulière et les transports collectifs. Les informations disponibles pour construire un modèle de choix du mode sont le partage modal observé, les caractéristiques des populations qui se déplacent, les caractéristiques techniques des modes en concurrence. Le nombre de déplacements distribués entre paire de zones est alloué entre la voiture particulière et les transports collectifs sur la base des temps et coûts relatifs des déplacements entre modes. Dans les modèles les plus sophistiqués des études de planification des transports urbains, la répartition modale se présente ainsi :

$$\frac{T_{ij}^{auto}}{T_{ij}^{TC}} = f(F_{ij}^{auto}, F_{ij}^{TC}, S_i, LU_j) \quad (0-4)$$

Ainsi, la part des déplacements entre i et j allouée à la voiture particulière dépend des fonctions de coûts de transport en voiture particulière (F_{ij}^{auto}), et en transports collectifs (F_{ij}^{TC}), et dans certains cas, des caractéristiques socio-économiques de la zone d'origine (S_i) et des caractéristiques d'occupation des sols de la zone de destination (LU_j). Cependant, dans les modèles conventionnels du moins ceux des années soixante, les techniques de modélisation et d'estimation adoptées demeurent relativement frustes.

214. L'étape d'affectation

Dans le sous-modèle d'affectation sur itinéraire, les déplacements d'une zone i à une zone j , pour un motif donné et pour un mode donné, sont affectés sur une représentation simplifiée du réseau routier ou du réseau des transports publics. Pour les déplacements en véhicule particulier, les déplacements de personnes doivent être convertis en déplacements de véhicule en utilisant un coefficient d'occupation du véhicule moyen.

Les sophistications des modèles d'affectation se sont considérablement accrues pendant les années 50 et 60. Les premières approches ont porté leur intérêt sur l'affectation sur un unique itinéraire supposant la capacité de chaque lien du réseau infinie. La méthode consiste dans un premier temps à identifier l'itinéraire le moins coûteux à partir d'une origine donnée et par paire de destination, et à affecter le nombre total de déplacements à cette route sur la base du principe du tout ou rien. Cette méthode a de fortes limites quant à ses hypothèses telles que l'hypothèse de capacité infinie et celle de l'information parfaite des consommateurs. L'omission de la contrainte de capacité conduit à des résultats étranges et irréalistes, parce que le trafic sera affecté seulement sur les axes qui présentent le coût minimum, même si ces liens sont surchargés. Les contraintes de capacité, basées sur une détermination empirique générique à partir de la relation débit/vitesse, ont été introduites dans une procédure itérative afin d'équilibrer les flux de véhicules et les vitesses sur chaque lien du réseau. L'introduction de la contrainte de capacité conduit à considérer les modèles d'affectation multi-chemins qui sont conformes au premier principe de Wardrop. L'idée de base de ce principe repose sur le concept d'équilibre. En situation de congestion, le trafic se répartira parmi les différentes alternatives d'itinéraire de transport entre une paire de zones particulières de façon à ce que le temps ou le coût de déplacement devienne égale sur tous les différents itinéraires utilisés. Le résultat est un équilibre qui est optimal du point de vue de chaque usager. Le module d'affectation peut être schématisé comme suit :

$$T_{ia} = f(\text{itinéraire le plus court, capacité}) \quad (0-5)$$

Pour les économistes, les trois premiers sous-modèles constituent la composante de demande des modèles conventionnels. Seul le premier élément, le modèle de génération de trafic, influence le niveau total de la demande, et est indépendant des prix et des temps de déplacement pour les alternatives de déplacements disponibles. Les éléments

successifs sont des modèles de partage, qui allouent la demande totale successivement selon les destinations, les modes et les itinéraires. Le choix de la période horaire n'est pas traité de façon explicite, les prévisions sont généralement effectuées pour une journée et l'heure de pointe, en supposant que les élasticités-croisées entre l'heure de pointe et l'heure creuse sont nulles. Les comportements d'offre ne sont pas modélisés de façon explicite. Les investissements d'infrastructures à évaluer sont déterminés de façon exogène et sont caractérisés comme des entrées. Les politiques d'aménagement du trafic ou les décisions sur l'offre de transport collectif risquent d'être retranscrites de façon très imparfaite, bien que certaines améliorations aient été considérées pendant les années 70. Les relations débit / vitesse sur les liens du réseau routier ne sont pas directement analogues à la fonction d'offre néoclassique. Il s'agit plutôt de fonctions de performances qui montrent de quelle façon les vitesses de déplacement affectent le niveau d'offre. L'équilibre dans ces modèles est atteint par une itération des volumes de trafic et des vitesses à l'intérieur du sous-modèle d'affectation routière, et (mais beaucoup plus rarement) par des rétroactions sur les vitesses ou les temps de déplacements intégrés dans un ou plusieurs des modèles précédents.

22. Les limites des modèles conventionnels

La période d'or de la méthode classique a été les années 60, époque des certitudes (Merlin, 1984). Dès la fin de cette décennie et pendant toute la suivante, les critiques se sont multipliées. Dans le même temps, quelques chercheurs tentaient des démarches ressortissant de logiques tout à fait différentes. Les modèles conventionnels ont été fortement critiqués pour leur coût élevé, leur manque de sensibilité aux politiques testées, ainsi que pour leurs déficiences techniques. Plusieurs types de critiques peuvent être adressées à ces modèles. On en distingue généralement deux : les critiques sur la forme des modèles, à savoir la structure et les techniques employées ; les critiques sur le fond des modèles, c'est-à-dire les hypothèses fondamentales sur lesquelles ils s'appuient.

221. Les critiques de forme

Ces critiques se situent à plusieurs niveaux et sont en partie liées les unes aux autres.

2211. La remise en cause de la causalité uni-directionnelle

La méthode classique part de l'hypothèse que le voyageur pour se déplacer effectue une série de « choix » successifs : génération, distribution, répartition modale et affectation. Dans la pratique, les modèles correspondant à ces étapes sont souvent mis en oeuvre de manière rigide et linéaire, le processus commençant par le calcul du nombre de déplacements générés et/ou attirés et se terminant par l'affectation des flux sur les réseaux de transport. Les effets rétroactifs sont donc fréquemment négligés. En fait, la méthode classique est, théoriquement du moins, itérative. Les attributs des réseaux, déterminés à l'issue d'un premier tour d'application des modèles devraient être réintroduits dans les modèles pour un deuxième, troisième et si nécessaire davantage de tours, en vue d'atteindre un équilibre entre l'offre et la demande de transport. Les interactions pourraient se situer à des niveaux différents de la modélisation, par exemple

entre la génération et l'affectation, entre le choix modal et l'affectation, entre la distribution et l'affectation. Cependant, les modèles à quatre étapes sont usuellement appliqués de manière uni-directionnelle. Un tel système suppose que chaque procédé est indépendant du procédé situé en aval.

2212. La remise en cause de la séquentialité

La procédure repose sur une méthode de modélisation dite à quatre étapes. Si ce schéma présente un certain nombre de commodités pour le planificateur, on est en droit de se demander s'il est réaliste. Un usager se trouve-t-il confronté à une telle succession de choix ? La décision de se déplacer est-elle réellement indépendante de la destination choisie, du mode de transport préféré ou même de l'itinéraire envisagé ? Le choix du mode ou de l'itinéraire ne peut-il différer selon la période horaire ? A supposer que cette succession de choix soit acceptable, doit-elle présenter le même ordre logique pour tous les individus ?

Une crise de confiance se manifeste donc à l'égard des chaînes des modèles conventionnels avec un calage différent pour chaque modèle. Un rapport de la CEMT dirigé par Bonnaïous (1976) souligne qu'il existe toute une hiérarchie de décisions interdépendantes, souvent simultanées. Ainsi, pour certains déplacements ayant en particulier une autre motivation que le travail, il y aura simultanément : décision de déplacement, choix du mode, choix de l'itinéraire. De plus, le choix du mode, pour de tels déplacements, sera en réalité un choix joint qui dépendra étroitement du mode de transport employé habituellement pour se rendre au travail, du niveau de motorisation du ménage, du lieu de résidence choisi, *etc.* De même, on peut noter des liens évidents entre le choix utilisé pour les déplacements domicile-travail et les décisions relatives à l'achat d'une automobile, à la localisation du domicile, à la profession exercée. Il convient de souligner que ces décisions hiérarchisées, interdépendantes et souvent simultanées ont des fréquences et des termes différents. Le terme des choix effectués étant très variable, il apparaît indispensable d'opérer une distinction entre les décisions à très court terme qui se renouvellent fréquemment et les décisions à moyen ou long terme dont la fréquence est très différente. Ainsi, alors que pour les déplacements « achats » ou « loisirs », le choix simultané et interdépendant du déplacement, du mode, de la destination, de l'itinéraire sera le plus souvent un choix quotidien, le choix du mode utilisé pour le travail aura dans le temps une portée beaucoup plus considérable. De même, les choix relatifs au taux de motorisation ou à la localisation du lieu de résidence seront moins fréquents encore et produiront leurs effets sur une période beaucoup plus longue. Il existe également un autre type d'interdépendance : les répercussions de l'offre de transport sur les choix des usagers. Or, bien des prévisions de demande se fondent sur le seul processus de détermination de la demande par l'offre.

Finalement, à chaque niveau temporel (court, moyen, long terme), il apparaît entre les décisions de choix des interactions à la fois verticales (le long terme réagissant sur le court terme), horizontales (dans le cas d'un déplacement « achat », la décision d'effectuer le trajet, le choix du mode et la destination seront interdépendants et simultanés ; de même, la décision d'achat d'une automobile et celle de son utilisation pour certains types de déplacement seront étroitement liées.

2213. La lourdeur des modèles

La succession des différents modèles, l'importance des calculs impliqués, mais aussi les données nécessaires et les enquêtes à effectuer conduisent à des modèles dont la manipulation se révèle être lourde. Cette lourdeur de la méthode peut être rapprochée à son caractère peu flexible. La plupart des modèles qu'elle utilise sont statiques : le temps n'est introduit qu'à travers des données exogènes (répartition prévue de la population et des emplois par exemple) ou des paramètres également déterminés de façon exogène. Il est difficile et lourd de tester des alternatives, qu'il s'agisse des hypothèses de départ, ou de la valorisation des différents éléments.

2214. L'agrégation des données

La procédure classique repose sur l'élaboration des modèles agrégés. Cela signifie qu'ils opèrent à partir de données agrégées, la plupart du temps selon un critère géographique. L'introduction de comportements moyens qui en découle tend à masquer la grande hétérogénéité des attitudes des ménages ou des individus face aux déplacements. Ce principe n'affecte pas uniquement les variables de demande. Certaines variables d'offre n'échappent pas non plus à une certaine réduction de la réalité.

2215. Le manque d'une logique cohérente

Un autre défaut des modèles conventionnels de transport est le manque d'une structure cohérente qui examinerait de façon jointe tous les aspects de la demande. La demande de déplacements est analysée en utilisant des approches différentes selon les quatre étapes du modèle. La génération des déplacements est usuellement réalisée par des méthodes de régressions linéaires fondées sur des spécifications *ad hoc*, la distribution des déplacements est largement fondée sur les modèles d'interaction spatiale qui reposent généralement sur des formulations gravitaires, le partage modal et l'affectation sont abordés avec des interprétations plus comportementales. Il manque donc une certaine cohérence interne entre ces différents modules.

2216. Des modèles non-comportementaux

Domencich et McFadden (1975) voient comme principale limite à ces modèles de ne pas être des modèles de comportements par nature, c'est-à-dire qu'ils ne sont pas fondés sur une théorie cohérente des comportements de déplacement. Ces caractéristiques induisent d'une part, certaines incohérences dans le système modélisé, d'autre part, un fort degré d'abstraction ou une représentation irréaliste des comportements de déplacement, et enfin, une incapacité à améliorer significativement le système dans son entier ou dans ses composantes constitutives. Ces modèles répliquent les résultats des conditions existantes au moment de l'enquête et ne fournissent que peu d'explication sur les modifications des décisions de déplacements provoquées par des changements des caractéristiques du voyageur ou en termes d'alternatives offertes.

2217. Ces modèles ne sont pas adaptés à tester des politiques de transport

Excepté pour le modèle de choix modal, ces modèles ne sont pas adaptés à tester des politiques. En effet, les impacts des politiques de transport ne peuvent pas être évalués par les modèles de génération, et ne peuvent être pris en compte que de façon très mécanique, par la fonction de distribution.

223. Les critiques de fond

Plus radicales, les critiques de fond doivent être classées selon qu'elles concernent les justifications théoriques de la méthode classique ou qu'elles soient de nature idéologique. Elles peuvent être classées selon deux thèmes. Le premier consiste à considérer que cette méthode, conçue aux Etats-Unis pour favoriser l'usage de l'automobile, et transposée en Europe sans suffisamment de précaution, est un outil au service de l'automobile. Le deuxième réside dans le fait que la méthode classique est fondée sur des modèles qui reproduisent la situation et visent à être conservateur. Au delà de ces critiques, nous devons souligner que bien qu'il s'agisse d'outils de modélisation au service de la planification à long terme, ces outils, de par leur nature, se révèlent peu adaptés à produire des prévisions de long terme.

2231. Un outil au service de l'automobile

Cette accusation a été faite en 1970 par des auteurs américains et français. En France, l'équipe CERAU-IRT concluait d'une étude sur le choix du mode dans les villes de province que l'utilisation des modèles classiques avait « quasiment conduit à une impasse dans les villes de province, en raison de la nature particulière de l'offre de transport actuelle qui, en général, privilégie l'automobile ». Ce point fut précisé par divers auteurs, en particulier le sociologue Webber. Celui-ci, s'inscrivant dans le débat sur l'emploi de la méthode d'analyse des systèmes, rappelle que l'automobile, à côté d'indéniables avantages, a aussi des inconvénients : l'amélioration de la voirie appelle le trafic, donc la congestion ; elle favorise l'allongement des distances ; elle exclut les minorités (âge, revenus) qui n'en disposent pas. Cette critique est néanmoins davantage adressée aux politiques favorisant l'automobile qu'aux instruments de modélisation. Elle dénonce le caractère inéquitable des efforts publics passés en faveur de l'automobile qui apportent des avantages à la majorité à revenus moyens et élevés et fait supporter les coûts (sociaux surtout) aux minorités.

En France, la critique fut plus tardive. Le premier, Gabriel Dupuy (1975), a affirmé que les modèles de la méthode classique constituaient « une technique de planification au service de l'automobile ». Le développement de ces modèles aux Etats-Unis correspondait à une problématique d'investissements routiers massifs, où les autres modes de transport, ne sont traités que comme des résidus. Dupuy s'intéresse aux conditions du transfert en France de cette méthodologie. A cette époque, l'Etat s'engage dans des plans d'investissements routiers urbains importants. Les services des ministères imposent certains tests afin d'évaluer ces projets, fondés sur la méthode classique américaine. Dupuy en recherche une explication. Il lui semble que, pour que les investissements envisagés puissent être financés, ils devaient, d'une part, assurer un développement de la circulation, d'autre part, satisfaire certains besoins de transport

(c'est la condition du financement par l'impôt). Pour Dupuy, les modèles conventionnels remplissaient parfaitement ce rôle puisqu'ils calculent des prévisions qui conduisent à un réseau assurant à long terme un développement de la circulation automobile. Ils remplissent une fonction idéologique : ils contribuent à légitimer l'action planificatrice de l'appareil d'Etat en présentant cette action comme appliquée au transport urbain, neutre, guidée par la science, orientée par l'« intérêt général », alors qu'elle est surtout technique, appliquée à la circulation des véhicules automobiles, orientée vers la production élargie du système économique route-automobile.

Cependant, on peut montrer que la critique de Dupuy vise en fait plus le mode d'utilisation qui a été fait de ces outils, que la méthodologie des modèles eux-mêmes. Les résultats de ces modèles sont largement influencés par les données exogènes concernant les paramètres socio-économiques des zones, les caractéristiques d'occupation des sols. Et ceci d'autant plus que les modèles ne sont pas utilisés de façon itérative. Par ailleurs, dans le contexte des années 60, la forte progression de la mobilité, la motorisation rapide, la croissance économique régulière et le développement urbain ont été autant de données exogènes qui justifiaient un accroissement du volume et de la longueur des déplacements.

2232. Un instrument conservateur

La seconde critique concerne le problème du calibrage des modèles. Faute de disposer de séries temporelles, en tout cas de disposer de séries longues, on a souvent recours, pour ajuster les modèles, à des coupes instantanées. Ce procédé donne à ces modèles un caractère conservateur à plusieurs niveaux. D'une part, les modes de transport pris en compte sont ceux existant actuellement ; d'autre part, les paramètres des modèles sont déterminés à partir de l'observation de situations et comportements actuels. Ils sont ensuite utilisés, souvent sans modification à établir des prévisions. Ce faisant, ils tendent à conserver les rapports actuels, par exemple, à privilégier l'utilisation de l'automobile plutôt que celle des transports publics. De ce fait, ils ne sont guère adaptés à produire des prévisions de long terme.

2233. Un outil inadapté à la prévision de long terme

Bien que les modèles classiques aient été utilisés pour éclairer la planification de long terme, de par la façon dont ils ont été appliqués et de par leur nature, ils se sont révélés inadaptés à la prévision de long terme. Ceci est lié à plusieurs raisons que nous avons déjà exposées. D'une part, ce sont des modèles statiques, la mise en oeuvre des rétroactions entre les étapes de simulation est très lourde à mener. D'autre part, le contexte urbain n'est pas sensibilisé. En effet, la structure de l'occupation des sols et la distribution géographique de la population sont introduites comme des données exogènes et supposées implicitement indépendantes de l'évolution du système de déplacements. Pour schématiser, les modèles classiques à quatre étapes n'intègrent que les liens en traits pleins de la figure 0-2, c'est-à-dire une structure descendante. Ils ne modélisent pas les liens interactifs existant entre les choix de déplacement et l'impact de modifications des conditions de transport sur le nombre de déplacements et sur des choix plus

fondamentaux en amont du système de déplacement, telle que la décision d'achat d'un véhicule, ou encore le choix de localisation des individus, des emplois et des activités. En outre, dans la mesure où il s'agit de modèles qui n'intègrent que très peu une dimension comportementale, leur pouvoir explicatif est pauvre.

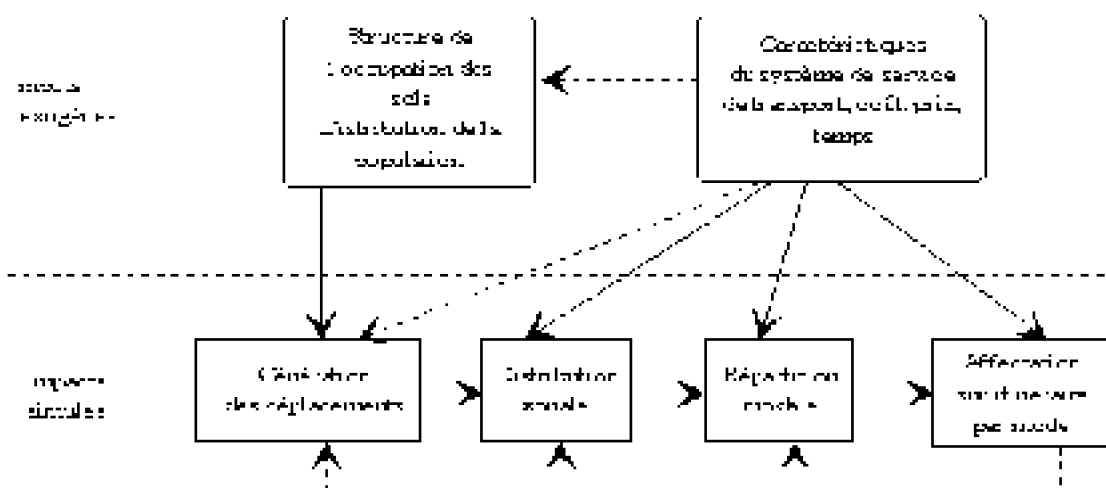


Figure 0-2. Schématisation de la structure dynamique du système de transport

Après avoir présenté les limites méthodologiques des modèles à quatre étapes, l'examen des erreurs et des causes d'erreurs de ces modèles est proposé. La plupart du temps, les causes d'erreurs sont liées aux limites exposées ci-avant.

23. Les erreurs dans les modèles conventionnels

231. La définition de l'erreur dans un modèle

S'interroger sur les erreurs d'un modèle renvoie à se poser la question de savoir si le modèle est proche de la réalité. Comment juger, ou mieux mesurer, si le modèle est proche de la réalité ? Leurent (1997) met en évidence que l'erreur dans un modèle est de nature plurielle, et doit être décomposée en erreur de conception, erreur formelle, erreur algorithmique et incertitude de type économétrique (qui englobe l'erreur d'estimation et l'erreur exogène). L'erreur de conception renvoie à l'analyse de la composition conceptuelle, c'est-à-dire à l'ensemble d'éléments et de relations entre éléments. Son étude passe par l'analyse systémique. L'erreur formelle renvoie à l'analyse de la formule caractéristique qui est la synthèse en langage mathématique des mécanismes explicatifs. On doit vérifier que la formule caractéristique est conforme au contenu conceptuel et doit être cohérente. Les mathématiques appliquées sont les instruments utilisés pour vérifier cette conformité. L'erreur algorithmique renvoie à l'analyse de la procédure de résolution. Celle-ci consiste à produire une solution par un dispositif *ad hoc*. Les disciplines impliquées sont la physique, l'algorithmique et l'informatique. L'analyse consiste à se demander si le dispositif fournit vraiment une solution, et avec quelle précision. L'erreur de type économétrique renvoie à l'analyse de l'alimentation économétrique du modèle c'est-à-dire à la spécification des fonctions de dépendance et des inputs. D'autres types

d'erreurs peuvent être considérées relativement au mode d'application des modèles. Par sa nature, son développement technologique, son organisation et ses croyances, la société influe sur le modèle et son usage. Un acteur qui intervient dans un processus de décision a deux raisons fondamentales pour employer un modèle : éclairer un problème, soutenir une argumentation. Ces deux fonctions se combinent de multiples manières selon l'objectif de l'acteur :

- . éclairer le mieux possible et partager les résultats, sans plaider pour un projet donné,
- . soutenir un projet par la « caution scientifique » du modèle, employé avec le souci d'un éclairage de qualité,
- . réclamer la « caution scientifique » mais sans souci de qualité d'éclairage, avec jusqu'à l'emploi forcé du modèle, ou la présentation de résultats qui n'ont aucun rapport avec le modèle,
- . éclairer le mieux possible et garder les résultats pour soi,
- . idem, tout en soutenant un projet donné par une application forcée.

Parfois, les modèles conventionnels ont été utilisés davantage dans la perspective d'apporter une caution scientifique au projet plutôt que de réellement éclairer le problème.

Par ailleurs, Godard (1981), lors de la 58^{ème} Table Ronde de la Conférence Européenne des Ministres des Transports, a proposé une synthèse des principales causes d'écarts qui peuvent être relevées entre les prévisions et les observations. Il distingue les causes directement observables et identifiables des écarts (qu'il appelle causes « immédiates ») et les causes plus diluées, d'ordre institutionnelles.

232. Les causes d'erreurs dans les modèles classiques

2321. Les causes d'erreurs immédiates

Quatre causes « immédiates » d'écart sont en général observées. Elles se traduisent, la plupart du temps, par une surestimation des trafics. Elles sont liées à la structure des modèles, aux erreurs de prévision des paramètres externes du modèle, sur les hypothèses implicites relatives à l'environnement extérieur.

La qualité de certaines prévisions à court terme par opposition aux fortes surestimations observées dans le long terme révèle des défauts inhérents à la structure même des modèles. L'un des plus importants repose sur une incapacité des modèles à intégrer les phénomènes de rupture, en particulier concernant l'évolution des comportements de déplacements. Les chocs pétroliers constituent un exemple de rupture qui a pu induire, au moins pour un temps, un décalage considérable entre les prévisions

des modèles et la réalité.

Les prévisions des variables exogènes utilisées par un modèle sont souvent elles-mêmes issues du résultat d'un modèle ou d'une estimation plus ou moins aléatoire de la part des responsables techniques ou politiques. Les erreurs commises sur les variables exogènes se répercutent bien évidemment sur les prévisions du modèle et provoquent des écarts plus ou moins sensibles. Le meilleur exemple est constitué par les variables d'urbanisation dont les hypothèses peuvent se révéler erronées par suite de l'abandon ou de la modification d'un projet urbanistique ou tout simplement par une connaissance insuffisamment maîtrisée du devenir de certaines zones urbaines. Les erreurs relatives aux hypothèses d'évolution des variables exogènes sont souvent à l'origine d'importantes surestimations ou sous-estimations du trafic. Ces erreurs apparaissent, en général, plus importantes lorsque l'analyse est concentrée sur des portions limitées du réseau étudié.

Enfin, un certain nombre d'éléments relatifs à l'environnement extérieur du projet peut avoir été négligé de façon plus ou moins implicite. Lors d'une étude portant sur le développement d'un réseau de transports collectifs, la non prise en compte d'une amélioration éventuelle du trafic routier pourra se traduire par une surestimation des déplacements effectués en transports collectifs.

2322. Les causes d'erreurs institutionnelles

Les causes dites « immédiates » expliquent un certain nombre d'écarts entre les prévisions et les résultats finalement observés. Mais pour Godard, elles ne sont toutefois pas suffisantes pour expliquer la totalité de ces écarts. Quelle que soit la qualité du modèle ou la compétence de ses utilisateurs, les prévisions sont la résultante de choix d'hypothèses répondant à une logique institutionnelle. Certains paramètres apparaissent ainsi davantage comme des objectifs que comme de simples prévisions. Il est du ressort d'une institution, partie prenante d'un projet, de choisir une série d'hypothèses vraisemblables. Mais il faut avoir conscience que ce choix est dans presque tous les cas emprunt d'une certaine subjectivité plus ou moins bien maîtrisée. La confiance aveugle dans le prolongement d'une croissance économique forte comme celle des années 50 et 60 en constitue une bonne illustration.

233. Les résultats d'une étude d'évaluation des erreurs dans les modèles classiques

Peu de travaux se sont attachés à estimer le niveau de précision des modèles classiques. Une étude réalisée par McKinder et Evans est l'une des rares à offrir cette opportunité. Commencée en 1978, cette étude a porté sur 44 travaux réalisés entre 1962 et 1971. Elle décrit les résultats obtenus à partir d'une douzaine de variables de prévision. Pour chacune de ces variables, qu'elle soit exogène ou endogène, le rapport établit une synthèse des niveaux caractéristiques d'erreurs qui ont pu se produire sur une période de 10 ans et constate que les planificateurs dans leur ensemble ont plutôt eu tendance à surestimer ou sous-estimer l'impact de ces variables. Il est à noter que seuls les modes en voiture particulière et en transports collectifs ont été étudiés. De cette étude, les

auteurs ont ciblé trois principales sources d'erreurs : les erreurs commises lors de la mesure des données, les erreurs propres à la spécification du modèle, et les erreurs relevées lors de l'utilisation des modèles.

Les principaux écarts ont été observés sur les estimations des variables socio-économiques, principaux inputs des modèles. La population a été surestimée de façon quasi systématique. Les hypothèses de croissance économique ont été également surestimées. Il n'est d'ailleurs pas surprenant de noter que ce sont les emplois du centre qui ont été les moins bien estimés. Les auteurs attribuent les raisons de ces surestimations à la conjonction de deux phénomènes. D'une part, des hypothèses trop optimistes de la croissance de la population au niveau national, d'autre part, les hypothèses erronées de la part des autorités locales relatives au déclin économique de certaines zones. Les responsables locaux n'ont pas su prévoir une chute des emplois ou lorsqu'ils avaient le choix, ont préféré s'appuyer sur des hypothèses hautes.

En outre, les erreurs de prévision relatives au taux de motorisation ou au revenu des ménages sont supérieures à celles des variables précédentes. Si la plupart des études a prévu une élévation du taux de motorisation, 35 études sur 38 ont surestimé cette croissance. McKinder et Evans expliquent cette surestimation par l'optimisme de la prévision, basée sur une croissance économique forte.

Les déplacements totaux ont été surestimés par l'ensemble des études. Cette surestimation s'est révélée supérieure pour les déplacements effectués en transports collectifs. C'est le trafic de transit qui semble avoir été le moins bien estimé.

Pour finir, les auteurs de cette étude ont tenté de vérifier si les erreurs constatées relevaient davantage d'erreurs commises sur les variables exogènes ou si elles pouvaient être dues à des erreurs de spécification des modèles. Ils ont pu constater que plus de la moitié des erreurs de prévision relatives aux déplacements routiers peuvent être imputables aux estimations des variables exogènes. Les erreurs de prévision concernant les déplacements en transport ne peuvent, en revanche, être expliquées par des erreurs commises en estimant l'évolution future de variables telles que la population ou la possession d'une voiture mais plutôt par la non prise en compte de certaines variables explicatives comme la distance ou le tarif. Enfin, la combinaison des trafics de transports publics et privés, laisse apparaître que sur les 28% d'erreurs commises, la moitié seulement relève d'une mauvaise estimation des variables exogènes. Le reste peut sans doute être expliqué par l'oubli de certaines variables et la faiblesse de l'hypothèse d'une stabilité dans le temps des taux de déplacements mécanisés pour les différents types de ménage.

L'étude de McKinder et Evans a ainsi confirmé la surestimation de nombreuses variables endogènes et exogènes qui n'est pas propre aux modèles britanniques. Les modèles de trafic ont été développés dans une période de forte croissance économique que rien ne semblait *a priori* pouvoir remettre en cause. Les bouleversements qui ont suivi les deux chocs pétroliers ont souligné la faiblesse des hypothèses basées sur un simple prolongement de tendances observées par le passé.

L'approche désagrégée, présentée par la suite, offre une autre perspective de la modélisation de la demande de déplacements, davantage explicative.

Section 3. Les modèles désagrégés

Les critiques des modèles conventionnels de transport ont incité à une recherche intense, à partir des années 70, conduisant au développement des modèles comportementaux de demande. Les premiers travaux ont été menés par McFadden (1973) et Ben-Akiva (1973) qui ont formulé les problèmes de décision du mode de déplacement et de la localisation comme des problèmes de choix du consommateur micro-économique parmi des alternatives discrètes. Malgré la difficulté d'associer à ces modèles désagrégés des objectifs précis pour la simple raison que les utilisateurs de ces modèles sont nombreux, deux objectifs principaux peuvent être distingués (Raux, 1983). Le premier est de construire des modèles capables d'afficher une sensibilité plus forte que les modèles agrégés aux variables techniques du système de transport : vitesse, coût, qualité de service. C'est l'objectif de la gestion technique du système des transports. Le deuxième, plus général et plus ambitieux, est de construire des modèles capables de mieux représenter le comportement des individus dans le système des transports. Il rejoint partiellement le premier objectif dans la mesure où la recherche de la sensibilité des modèles aux variables de niveau de service passe par l'analyse du comportement des individus.

La recherche sur les modèles probabilistes décrivant le choix des individus s'est initialement centrée sur le choix du mode dans les déplacements liés au travail. Plusieurs raisons liées peuvent être avancées à cela : d'une manière générale, le module de choix du mode apparaît comme le maillon faible de la chaîne classique à quatre étapes des modèles agrégés, étant donné la pauvreté des hypothèses mises en jeu dans ceux-ci ; d'autre part, cette étape de répartition modale est celle où l'ensemble des alternatives semble être défini le plus facilement. Il était donc séduisant de considérer la répartition modale comme l'agrégation de processus individuels de décision ; enfin les déplacements liés au travail, notamment avec les phénomènes de pointe de trafic, étaient, de par leur importance, l'objet d'investigation spécifique et le terrain d'action possible pour la politique des transports, action qui serait ainsi guidée par l'analyse des mécanismes individuels de choix. Le développement des modèles désagrégés répond à la nécessité de passer à une approche causale des phénomènes. Un modèle comportemental implique la représentation des choix individuels lorsque les usagers des transports sont confrontés à des alternatives. Les choix relatifs au déplacement sont la fréquence du déplacement, l'heure de déplacement, la destination, le mode de transport et l'itinéraire.

31. Les principes des modèles désagrégés

Les modèles comportementaux de demande de déplacements se distinguent des modèles conventionnels à quatre étapes de deux façons. D'une part, l'analyse est effectuée au niveau du décideur, telle qu'une personne ou un ménage, plutôt qu'à partir des flux zonaux. D'autre part, ces modèles se fondent sur la théorie micro-économique du comportement du consommateur, plutôt que sur la base de spécifications *ad hoc*.

Les modèles probabilistes de choix permettent de décrire le processus de décision d'un individu à un instant donné : ils calculent la probabilité, pour un agent économique

d'effectuer une sélection « parmi un ensemble limité d'éventualités mutuellement exclusives ». Ainsi, l'approche désagrégée raisonne par rapport à un individu t ayant des caractéristiques socio-économiques et de différenciation des offres de transport qui lui sont propres, qui font qu'il est intrinsèquement différent de tout autre individu. La modélisation désagrégée renvoie à la mesure du poids des variables intervenant dans le processus de décision des individus. Elle permet de comprendre leurs logiques de comportements de déplacement en matière de choix discret simple (mode de transport, par exemple) ou combiné (choix du mode et de destination, par exemple). La notion de choix discret renvoie donc à un ensemble d'alternatives dénombrables. Pour ce faire, on associe, à chaque alternative constituant l'ensemble étudié, une fonction d'utilité qui dépendra essentiellement des individus et des caractéristiques de l'alternative elle-même. Les résultats se présentent sous forme de probabilités. Grâce à elles, on obtient le niveau de la demande de déplacements futurs (par mode si le choix concerne les modes), compte tenu des tests de politiques de transport qui ont été effectués en faisant varier les composantes des fonctions d'utilité. Les modèles de ce type sont appelés modèles de choix discrets, par analogie avec le terme anglo-saxon (*discret choice model*).

Les modèles de choix de déplacement sont fondés sur le concept de l'utilité aléatoire. La théorie considère que l'utilité d'un consommateur t qui choisit l'option i contient à la fois une composante systématique $V_i^t(X_i, S_t)$ (qui est l'utilité moyenne de l'alternative i pour l'individu t associé aux caractéristiques socio-économiques S_t) et une composante non observable $\varepsilon(X_i', S_t)$. La fonction d'utilité aléatoire s'exprime de la façon suivante :

$$U_i^t = V_i^t(X_i, S_t) + \varepsilon(X_i', S_t) \quad (0-6)$$

où X_i et X_i' représentent les attributs observables et non observables respectivement de l'alternative i .

Si le consommateur effectue le choix i , nous supposons que U_i^t est l'utilité maximale parmi les J utilités où $j=1...J$. Ainsi, le modèle statistique est défini par la probabilité que le choix i soit effectué. Cette probabilité est donnée par :

$$P_i^t = \Pr[V_i^t + \varepsilon_i^t \geq V_j^t + \varepsilon_j^t] \quad (0-8)$$

$$P_i^t = \Pr[V_i^t + \varepsilon_i^t \geq V_j^t + \varepsilon_j^t] \quad (0-8)$$

$$P_i^t = \Pr[\varepsilon_i^t - \varepsilon_j^t \geq V_j^t - V_i^t] \quad \text{pour tout } j \neq i \quad (0-9)$$

Le modèle est rendu opérationnel par un choix particulier de la distribution des composantes aléatoires de la fonction d'utilité. Le moyen le plus simple d'obtenir une solution à P_i^t est de supposer une distribution de Weibull (appelée également distribution double exponentielle) des aléas $\varepsilon(X_i', S_t)$. Ce type de distribution conduit aux modèles logit. D'autres hypothèses peuvent être faites sur les composantes aléatoires de la fonction d'utilité. Le modèle logit prend la forme suivante :

$$P_i^t = \frac{\exp[V_i^t(X_i, S_t)]}{\sum_j \exp[V_j^t(X_j, S_t)]} \quad (0-10)$$

où P_i^t est la probabilité que l'individu t choisisse l'alternative i ; X et S sont deux vecteurs représentant les attributs de l'alternative i et les caractéristiques de l'individu t .

La formulation logit est pratique et commode. En particulier, elle peut être calibrée relativement facilement et de façon efficace. Une des caractéristiques majeures de cette formulation logit est l'hypothèse d'indépendance des alternatives non associées (*independence of irrelevant alternatives - IIA*). Cela entraîne que l'estimation des coefficients ne sera correcte que si la distribution des variables est indépendante des choix effectués par les individus. La propriété IIA est liée au fait que la probabilité relative qu'un individu t choisisse l'alternative i plutôt que l'alternative j ne dépend que des caractéristiques des alternatives i et j .

$$\frac{P_i^t}{P_j^t} = \frac{e^{V_i^t}}{e^{V_j^t}} \quad (0-11)$$

La probabilité relative de choix (entre i et j) est donc indépendante des autres alternatives disponibles : tant que les valeurs de V_i^t et de V_j^t ne changent pas, la

probabilité relative ne changera pas, au regard des autres alternatives qui sont ajoutées ou supprimées de l'ensemble de choix. Cette propriété présente certains avantages et inconvénients qui seront discutés par la suite.

Les modèles comportementaux désagrégés de la demande de déplacements présentent un certain nombre d'avantages sur les modèles conventionnels. Premièrement, ils ont des fondements théoriques ce qui procure une base pour modéliser les comportements de déplacements de façon cohérente. Deuxièmement, les modèles de comportement de demande sont plus adaptés à tester des mesures de politiques. Les élasticités directes et croisées peuvent être utilisées pour simuler les effets de changement à la fois induits par des variables de prix et des variables hors prix. Un troisième avantage est que les implications en termes de bien-être des changements de mesures politiques peuvent être évaluées à l'intérieur du système. Cette caractéristique a été particulièrement utile dans l'analyse moderne des transports.

Bien que ces modèles comportementaux de la demande de transport présentent une avancée non négligeable dans le domaine de la modélisation des transports urbains, ils souffrent néanmoins d'un certain nombre de limites.

32. Les limites des modèles désagrégés

Le Nir (1991) tire un bilan mitigé des modèles désagrégés. Il reconnaît qu'ils ont remporté depuis les années 70 un succès indéniable dans un certain nombre de pays, en particulier

aux Etats-Unis, mais souligne qu'en France, au moins jusqu'au début des années 90, ces modèles n'ont pas fait l'objet d'une généralisation au plan théorique.

Au préalable, une critique plus générale de l'outil désagrégé peut être proposée. Raux (1983), sur la base des critères d'opérationnalité définis par Bonnaïfous (1989), souligne les principales carences de ces modèles. Il s'interroge sur les qualités que doivent comporter les modèles désagrégés afin de prétendre à l'opérationnalité scientifique, à savoir les propriétés de pertinence, de cohérence et de mesurabilité.

321. La pertinence des modèles désagrégés

Raux souligne que l'exigence de pertinence semble être le parent pauvre par construction du modèle quantitatif en matière de transports urbains. Le modèle vérifiera généralement la condition de cohérence interne (celle du discours mathématique) et se limitera par sa nature quantifiée à certains domaines mesurables. Cette limitation et cette formalisation mathématique nécessitent un certain nombre d'hypothèses simplificatrices : cette simplification ou réduction est inhérente à tout modèle, dont les hypothèses risquent d'être en infraction avec la réalité. Ainsi, s'interroger sur la pertinence des modèles désagrégés revient à remettre en cause certaines hypothèses sur lesquelles ils sont fondés.

Les modèles logit reposent sur une hypothèse d'indépendance des alternatives non associées (IIA), qui a été exposée dans la section précédente. La préférence d'un décideur entre deux alternatives ne dépend que de la différence des utilités mesurées entre ces deux alternatives. D'après cette hypothèse, l'introduction d'une nouvelle alternative dans un jeu d'alternatives donné modifiera les parts absolues de marché, mais laissera inchangées les parts relatives des alternatives considérées deux à deux. Il s'avère que cette propriété est loin d'être respectée dans la réalité. L'introduction d'une ligne de métro, par exemple, aura tendance à enlever une part de marché plus importante aux autres modes collectifs plutôt qu'à la voiture particulière.

Enfin, la maximisation de l'utilité par un individu ne permet pas de prendre en considération les contraintes inter-relationnelles auxquelles il peut être soumis, en particulier au sein de son ménage.

322. La cohérence des modèles désagrégés

La recherche d'une certaine cohérence entre le modèle et la formalisation d'un processus de choix à étapes interdépendantes débouche sur le modèle séquentiel (Raux, 1983). Cette formalisation consiste à décomposer le choix en un certain nombre d'étapes élémentaires, dépendantes entre elles (structure récursive) par l'intermédiaire des utilités espérées, telles qu'à l'intérieur de chacune de ces étapes élémentaires les alternatives considérées sont indépendantes entre elles pour pouvoir appliquer le modèle logit standard. Cette structure apparaît comme un compromis entre la pertinence qui consiste à admettre l'interdépendance des étapes de choix entre elles et la mesurabilité qui nécessite une certaine séparabilité et donc une certaine indépendance des étapes entre elles.

Par ailleurs, la cohérence avec les objectifs du modèle implique un centrage du

modèle sur les variables techniques du système de transport que sont le coût et la durée plus ou moins décomposés des déplacements. Ces variables doivent entrer dans le modèle sous leur forme mesurée objectivement, les gestionnaires du système de transport n'ayant la maîtrise que de ces valeurs objectives. Cette nécessité entre en conflit simultanément avec les conditions de mesurabilité et de pertinence du modèle. Si ces variables sont reconstituées au niveau individuel à partir de caractéristiques du réseau telles que coûts ou vitesses moyennes, elles introduisent des erreurs risquant de nuire à la qualité des résultats du modèle qui repose sur la précision de la mesure des durées des trajets élémentaires. De plus, l'utilisation de telles variables zonales est en contradiction avec la détermination, nécessaire au plan théorique, des variables au niveau individuel. En outre, une approche pertinente suppose que le modèle se fonde sur les variables telles qu'elles sont perçues par l'individu. Ce sont celles qui lui permettent d'évaluer son niveau d'utilité pour se mettre en accord avec les fondements théoriques du choix. Mais l'utilisation de telles variables entre en conflit avec les objectifs des variables du système de transport. Une position pragmatique consisterait à dire que le modèle représente à la fois la formation des perceptions de ces variables physiques et les réactions à ces perceptions. Cette position laisse toutefois entier le problème du passage de ces valeurs objectives aux valeurs perçues, qui serait saisi sous la forme d'une « boîte noire » par le modèle, l'exposant à de graves erreurs de prévision dans le cas d'une modification des mécanismes de perception. La résolution de ce problème apparaît comme la condition pour l'élaboration d'un modèle de comportement en accord avec la théorie du choix individuel.

Le Nir (1991) souligne que « si la cohérence interne de ces modèles semble avoir été à peu près respectée, on ne peut pas en dire autant de leur cohérence vis-à-vis des objectifs théoriques. Les modèles désagrégés ont été développés en réponse aux limites des modèles agrégés classiques. La présentation de ces limites nous a permis de souligner le caractère insatisfaisant du schéma séquentiel et les risques d'utilisation de ces modèles à un horizon trop éloigné. Les modèles désagrégés ne semblent guère avoir apporté de solution à ces problèmes ».

Le développement des transports collectifs a entraîné un regain d'intérêt pour la phase de répartition modale. Celle-ci a focalisé la grande majorité des travaux désagrégés, sans remettre obligatoirement en question l'ensemble du processus. Les modèles désagrégés d'utilités croisées, qui se sont efforcés de représenter par un unique type de séquence le processus décisionnel individuel, ont laissé apparaître des écarts importants entre les prévisions et les résultats observés.

Enfin, les relations entre les variables socio-économiques caractéristiques des individus et les variables relatives au système de transport sont fondées sur des observations en coupe instantanée. Ainsi, si elles permettent d'estimer les effets de mesures de court terme, en revanche, elles rendent hasardeuse toute prévision à un horizon plus lointain.

323. La mesurabilité des modèles désagrégés

Le respect du critère de mesurabilité est subordonné à deux éléments : le premier est

constitué par la mesure individuelle des caractéristiques des alternatives ; le second est lié à la définition de l'ensemble des alternatives de choix. Le premier élément est soumis à la condition de la cohérence du modèle avec ses objectifs. Quant au second, la détermination de l'ensemble des alternatives qui s'offrent à l'individu est cruciale sur le plan de la cohérence du modèle : pour chacune des alternatives de l'éventail de choix associé à l'individu, la probabilité de choix doit être non nulle. Or, on ne fait qu'observer des choix révélés et non des probabilités, ce qui implique une inférence à partir des observations sur l'éventail des alternatives offertes : le regroupement d'individus ayant des éventails de choix différents, ce qui suppose du point de vue théorique des modèles de choix différents, modifie la valeur de la fonction de vraisemblance associée et introduit une erreur dans l'estimation des paramètres du modèle.

Les progrès effectués dans la tentative d'explication de la demande de transport ont eu le mérite de mieux cerner les comportements des citadins (modèles désagrégés). Cependant, l'accent n'a pas été toujours suffisamment mis sur le contexte géographique dans lequel est plongé l'individu désireux ou contraint de se déplacer. En d'autres termes, l'amélioration de la connaissance des comportements individuels a été menée en considérant les citadins d'une « ville abstraite » ou définie en termes généraux et imprécis (Balavoine, 1981). Les conséquences de cet appauvrissement méthodologique sont importantes. Considérer la ville comme une entité neutre, uniquement définie en termes de population ou de surface, c'est nier à l'agglomération l'originalité de la distribution spatiale des fonctions urbaines qui régit les déplacements.

En outre, ces modèles désagrégés répondent principalement à une problématique de planification à court terme. Après ce repli de la gestion à court terme des systèmes de transports urbains, la nécessité d'une dimension stratégique devient le leitmotiv de tous les responsables de la planification. Elle va alors encourager le développement des modèles stratégiques urbains et des modèles interactifs de transport et de localisation. Ces modèles s'efforcent d'une part, de considérer un horizon de long terme, et d'autre part de surmonter la critique adressée aux modèles à quatre étapes d'être trop statiques et conservateurs, par la prise en compte des interactions du système de déplacements.

Section 4. Des voies de progrès pour la modélisation de la demande de déplacements

Les insatisfactions que donnent les modèles classiques, d'une part, et les modèles désagrégés d'autre part, tiennent à leur horizon temporel mal défini et à ce que le caractère intermédiaire de la demande de transport est mal pris en compte (Quinet, 1998). Certains modèles tentent de mieux intégrer la dimension temporelle. Il s'agit d'une part, des modèles dynamiques à horizon temporel de court terme, qui intègrent explicitement les changements de la demande, c'est-à-dire modélisent les comportements d'adaptation des usagers et les effets d'apprentissage. D'autre part, les modèles interactifs de transport et d'urbanisation, qui intègrent la dimension temporelle de long terme, et prennent davantage en compte le caractère intermédiaire de la demande de transport. Ce sont ces derniers types de modèles qui attirent notre attention dans cette thèse.

41. La prise en compte des échelles temporelles de court terme : les modèles dynamiques

Si l'on considère une échelle temporelle de très court terme, celle des durées inférieures à l'heure, les modèles de modélisation de la demande de transport urbain standard, qu'ils soient agrégés ou désagrégés, sont mal adaptés car ils raisonnent sur des situations stationnaires et équilibrées alors que l'on sait bien que les conditions de circulation changent rapidement entre le moment du départ de chez soi et celui de l'arrivée, surtout dans les situations de congestion (Quinet, 1998). Les usagers s'adaptent par des processus d'apprentissage, utilisent leur expérience passée et l'information dont ils disposent pour faire face à des situations chaque jour différentes. La prise en compte de ces éléments passe par le développement des modèles dynamiques qui intègrent explicitement les changements de la demande.

Traditionnellement, les modèles supposaient implicitement que la demande et les conditions du trafic étaient stables de jour en jour. En fait, l'observation quotidienne suggère que cette hypothèse est loin d'être vérifiée. D'une part, la matrice O-D varie en fonction du jour de la semaine, en fonction de la période de l'année et de manière totalement aléatoire. D'autre part, les capacités des routes varient en fonction des conditions météorologiques. De plus, les accidents de la circulation, qui sont par essence imprévisibles, constituent environ la moitié des causes de congestion. Les modèles fonctionnent la plupart du temps selon le concept d'équilibre de Wardrop. Prenons deux routes en parallèle reliant un point origine O à un point destination D. Chaque conducteur utilise la route la plus courte (en temps). Si cette règle est très simple à appliquer pour un usager unique, elle l'est beaucoup moins lorsque les décisions des uns affectent les décisions des autres. Dans ce cas, aucun usager ne prend de bonne ou de mauvaise décision, le système est à juger globalement. Un équilibre statique est atteint lorsqu'aucun usager ne peut modifier son temps de départ en vue de diminuer strictement son temps de trajet. Ce concept peut être étendu facilement dans le cas de réseaux de transport généraux : étant donné une matrice O-D, un réseau de transport et des lois reliant le taux d'utilisation et la vitesse de déplacement, un équilibre statique correspond à des choix de routes tels qu'aucun utilisateur ne peut aller de son origine vers sa destination, en trouvant un chemin strictement plus rapide.

Ainsi, les modèles statiques supposent essentiellement que la congestion est constante au cours de la période de temps examinée (qui correspond le plus souvent au pic horaire du matin). Cette hypothèse n'est que peu satisfaisante dans un contexte urbain : en effet, un grand nombre de situations diverses peuvent correspondre à la même densité moyenne et produire des vitesses moyennes très différentes. Vickrey (1969) propose un modèle dynamique « d'équilibre partiel » dans le cas du transport automobile. Le modèle de Vickrey est dynamique dans le sens où la vitesse des véhicules dépend de l'heure de la journée. Le modèle décrit les déplacements domicile (O) - lieu de travail (D) pour le pic horaire du matin. La fonction d'objectif de l'individu est bi-critère : l'automobiliste désire minimiser son temps de trajet mais aussi arriver à une heure donnée à sa destination. Ces deux objectifs sont contradictoires (d'où l'intérêt d'étudier les services avec demande de pointe). Le choix de l'utilisateur est ici un choix continu : celui de

l'heure de départ. Les usagers ont la possibilité de voyager hors des heures de pointe, mais en arrivant à leur destination en des temps peu satisfaisants (trop tôt ou trop tard) ou d'endurer un temps de trajet plus élevé, mais en arrivant à leur destination dans une plage plus raisonnable. Pour le modèle de congestion retenu par Vickrey, le temps de trajet à un instant donné est proportionnel au nombre d'utilisateurs de la route à cet instant.

Les modèles dynamiques ne s'appliquent, pour le moment, qu'au choix d'itinéraires et s'affranchissent de l'hypothèse de stationnarité. Ils tiennent compte explicitement des variations temporelles de la demande. Pour cela, le temps est séparé en intervalles de l'ordre de la minute ou fraction de minute, les flux entrant et sortant sur chaque arc sont datés, ainsi que les lois de conservation des flux. Selon les modèles, les usagers voient leur date de départ imposée ou au contraire la choisissent compte tenu des conditions de transport et de leur désir d'une date d'arrivée souhaitée, avec pénalités en cas de retard ou d'avance.

Jusqu'à présent, ces modèles restent à l'état de recherche, et n'ont été utilisés qu'à titre expérimental sur des réseaux fictifs simplifiés. De Palma et Marchal (1996) présentent le modèle METROPOLIS qui adopte une approche mésoscopique dans la mesure où la description du réseau s'apparente à l'approche macroscopique (faible nombre de paramètres et réseau de grande taille) mais où, toutefois, les usagers ont des caractéristiques individuelles qui ne sont pas agrégées dans la simulation. METROPOLIS propose un système intégré de gestion du trafic urbain. Cet outil de modélisation dynamique permet de déterminer au mieux l'impact des mesures visant à réduire la congestion. Il prend en compte la variation de l'offre au cours de la période analysée et décrit de manière endogène la variation de la matrice O-D au cours de la journée. Il décrit le mouvement des navetteurs dans le cadre des déplacements du domicile vers le lieu de travail. Dans ce modèle, les comportements des usagers ne sont pas modélisés en cherchant la réalisation du principe de Wardrop, mais par un processus de choix en rationalité limitée avec processus d'apprentissage d'un jour sur l'autre. Le conducteur est supposé effectuer des choix en matière de déplacements (choix modal, choix de l'heure de départ et du temps de trajet) en fonction de règles heuristiques. Les individus, dans le modèle, sont supposés disposer de capacités cognitives limitées. Les conducteurs sont supposés être associés à une paire origine-destination donnée et une heure de départ t et possèdent une fonction de coût inspirée des travaux de Vickrey (1969). Cette fonction de coût introduit des pénalités sur les arrivées précoces et sur les arrivées tardives à destination par rapport à une heure officielle de début de travail. Le modèle comporte également une étape de modélisation de la recherche d'une place de stationnement. Une autre caractéristique du modèle est qu'il n'implique pas au départ la connaissance désagrégée des caractéristiques des usagers (caractéristiques socio-économiques, heures souhaitées d'arrivée) mais qu'il les détermine à partir d'hypothèses, sur la forme des lois de répartition qu'elles suivent (le modèle déterminant par calibrage les paramètres dont dépendent ces lois). Les exigences en matière de données sont donc faibles. Les sorties du modèle sont les répartitions horaires des instants de départ par noeud, ainsi que la répartition horaire des trafics sur chaque arc.

42. La prise en compte des échelles temporelles de long terme : la

modélisation stratégique et les modèles interactifs de transport et d'urbanisation

L'évolution des systèmes de déplacements urbains depuis les années soixante-dix, comme nous l'avons vu précédemment, caractérisée essentiellement par la montée de la circulation automobile, l'allongement des distances parcourues, et des transports collectifs de plus en plus déficitaires, suscite l'inquiétude et pose le problème du « développement durable » ou du moins maîtrisé des villes. Cette prise de conscience des dangers de la poursuite des tendances passées et le constat d'échec des politiques menées jusqu'à présent ont conduit les responsables de la planification à envisager d'autres types de politiques. La définition de stratégies cohérentes pour gérer les déplacements sur la base d'une approche systémique et globalisante de l'espace urbain dans une perspective de long terme, s'est peu à peu imposée.

Dans une perspective de long terme, les modifications de l'offre de transport entraînent des transformations multiples ; elles ne portent pas sur les choix d'itinéraires ou de modes, ni sur les heures de départ et le chaînage des déplacements ; elles concernent le choix de la destination du déplacement, le nombre de déplacements et des choix plus fondamentaux tels que la décision d'achat d'un véhicule, ou encore les localisations d'emplois et d'activités ou de logements. Les conséquences à moyen et long terme des modifications des conditions de transport sont d'une part les révisions de certains choix d'activités (comme les lieux d'achat, voire d'emploi), d'autre part elles s'expriment à travers le trafic induit. Ce trafic induit est la partie la plus mal modélisée de toute la chaîne de déplacement (Quinet, 1998). Cela plaide en faveur de modèles introduisant des mécanismes de rétroactions entre les étapes de choix de déplacements, que sont les modèles stratégiques, et incite au développement des modèles intégrant explicitement les effets de localisation et relocalisation, c'est-à-dire intégrant l'interaction entre le transport et l'utilisation des sols.

421. La modélisation stratégique

Il apparaît clairement que toute mesure de transport est sujette à des risques, environnementaux ou financiers, et que ces mesures ont souvent des effets à long terme. Ceci explique pourquoi il existe un regain d'intérêt concernant les outils qui permettent la détection de ces risques et de leurs conséquences. De tels outils renvoient à des instruments permettant des simulations de long terme (>10 ans) des effets potentiels des politiques de transport dans un contexte en évolution et non contrôlé. Ces outils doivent également être flexibles, permettant de tester des alternatives de transport sous des hypothèses contrastées de l'évolution du contexte socio-économique (par exemple, la croissance économique, les revenus, etc.). Bien sûr, les résultats ne doivent pas être des précisions détaillées d'un futur inéluctable, mais plutôt des idées sur le degré des différentes tendances de développement connectées à des hypothèses contrastées et à différentes actions politiques. Ces outils doivent jouer un rôle pédagogique, aidant les autorités organisatrices à confronter les résultats possibles de leurs actions.

L'objectif d'un modèle stratégique est d'être capable à l'échelle d'une agglomération

de simuler les conséquences de politiques variées de transport, sous des hypothèses contrastées de développement urbain, socio-économique et démographique. Le concept de modèle stratégique n'est pas nouveau puisque par exemple le modèle QUINQUIN a été développé dans les années 80 (Bonnaïfous, 1985 ; Bouf, 1989 ; Tabourin, 1989 ; Bonnaïfous et Tabourin, 1995). Ce modèle prend en compte la dimension stratégique de long terme pour évaluer les conséquences des politiques de transport, dans le domaine du financement du transport public et de la congestion routière (Raux, Tabourin, 1992).

De nombreux modèles stratégiques ont été élaborés au Royaume-Uni dans le cadre d'études de transport, notamment à Londres (Olfield, 1993), à Birmingham (Jones, 1990) et à Edimbourg (Bates *et al.*, 1991). Ces modèles ont pour principe de fonctionner avec un nombre de zones réduit, une représentation de l'offre de transport par des relations flux-vitesses entre les zones, et une prise en compte des rétroactions de l'état de l'offre sur la demande. Dans la même veine, un modèle stratégique a été élaboré sur l'agglomération lyonnaise (Masson, 1995 ; Raux *et al.*, 1996). La structure générale d'un modèle stratégique obéit aux règles suivantes (Bates, 1993). Les modifications de la demande de transport sont d'une part, engendrées par des variables exogènes au modèle (effets dus à l'utilisation des sols, des revenus, de la possession de la voiture particulière) et d'autre part, provoquées par des variations des conditions de transport, exprimées par des coûts généralisés. Ainsi, les matrices O-D de la répartition modale et de la distribution, peuvent potentiellement être modifiées si les conditions de transport changent. Les modèles stratégiques prennent en compte l'ensemble du système de transport, c'est-à-dire les modes privés et les modes publics et les interactions entre ces modes. Ces modèles ont également la particularité de rendre compte des réactions des usagers suite à des variations des conditions de transport : modification du choix d'itinéraire, du choix du mode ou de celui de la destination du déplacement.

422. L'approche de la modélisation interactive des transports et de l'urbanisation

Les politiques de transport doivent être considérées dans le cadre de l'aménagement urbain et de la vie économique. Pour élaborer une stratégie globale et cohérente en matière de transport, il convient de tenir compte de toutes les interactions entre l'aménagement urbain, les transports et l'économie qui ont des effets sur les déplacements. Considérer isolément les politiques d'utilisation du sol et de transport et n'adopter qu'une approche à court terme a conduit à l'élaboration de politiques, qui ont certes parfois permis de gérer les problèmes dans l'urgence et de façon ponctuelle, mais à long terme ont eu des effets aggravants. Afin de définir des mesures d'intervention pertinentes, il faut se donner les moyens d'en évaluer les effets à long terme et pour se faire prendre en compte les rétroactions potentielles entre le système de transport et le système d'occupation des sols. Il faut considérer le caractère dynamique du développement urbain et le fait que les individus et les activités disposent d'une certaine capacité d'adaptation aux changements. Cette perspective de la planification des transports urbains a remis en question l'efficacité et la pertinence des modèles de prévision de la demande de transport jusqu'ici employés puisqu'elle aboutit à modifier l'objet même des modèles de transport. Ces modèles doivent en effet rendre compte non

plus de l'effet d'une mesure ponctuelle sur un segment donné de la demande, mais traduire les effets d'une politique de transport sur l'ensemble du système de transport et également prendre en compte ses répercussions éventuelles sur le développement urbain.

Historiquement, les théories relatives aux systèmes d'urbanisation et de transport ont été développées de façon relativement isolée les unes des autres, bien que leurs relations aient été discutées largement depuis de nombreuses années. Depuis 1970, des tentatives ont été menées afin de combiner des modèles d'urbanisation aux modèles de transport traditionnels à quatre étapes, donnant lieu à la première génération des modèles « combinés ». La principale caractéristique de ces modèles est que le modèle de transport ne traite plus les variables d'urbanisation comme étant exogènes et la rétroaction du système de transport sur les schémas d'urbanisation est explicitement reconnue. Le principe de l'existence d'une double relation entre la demande de transport et le type d'urbanisation a provoqué un effort de recherche qui s'est essentiellement orienté dans deux directions : une réflexion théorique à la base des efforts de modélisation ; une approche plus pragmatique dont l'objectif est un approfondissement de la connaissance de situations concrètes.

Le schéma classique adopté par la plupart des modèles est de considérer que le type d'urbanisation influe la demande de déplacement, son volume, ses composantes spatiales et modales. Ainsi, la relation urbanisation - système de déplacement n'est appréhendée que dans un seul sens ; les effets des modifications des conditions de transport sur l'urbanisation étant négligés.

Dans un souci d'amélioration de la pertinence des modèles de transports urbains, un courant de recherche sur les modèles dits intégrés de transport et d'urbanisation s'est développé, leur principale originalité étant d'examiner les interactions entre le système de transport et le système des localisations. L'idée qu'un modèle mathématisé et informatisé de transport et d'occupation des sols pouvait contribuer à une planification plus rationnelle de la ville a culminé dans les années 60 (Wegener, 1994). Cependant, les premiers modèles développés dans les années 60-70 ont été fortement décriés (Lee, 1973) au même titre que les modèles classiques. C'est donc surtout depuis les années 80 que l'on remarque le retour de cette méthodologie. Depuis la critique de Lee, ces modèles se sont perfectionnés et ont pris une importance grandissante dans les processus de planification à l'étranger. Aujourd'hui, comme nous l'avons souligné, il existe un contexte de planification très favorable au développement de ce type de modèles et des avancées théoriques et méthodologiques sur lesquelles peut s'appuyer cette démarche.

Ces modèles comportent une partie « transport », une partie « utilisation des sols » et éventuellement une partie « économique » (Webster *et al.*, 1988 ; Anas, 1987 ; Quinet, 1998). La partie « transport » définit, à système d'offre de transport donné et à localisations des activités et des résidences données, les flux de transport et les coûts de transport. La partie « économique » est en général fondée sur le principe de la théorie de la base ou sur les tableaux Entrées-Sorties. Jusque-là aucune relation n'explique les localisations des activités ou des individus. C'est à la partie « utilisation des sols » de le faire, et c'est là que les modèles se diversifient. Ces modèles seront plus largement présentés dans le chapitre 3.

Compte tenu de l'intégration de plus en plus forte des politiques de transport et d'urbanisation, l'usage de ces modèles sera d'une utilité croissante pour les prises de décision à long terme. C'est dans cette lignée de modèles que nous menons notre réflexion sur l'évolution des systèmes de déplacements en milieu urbain, que nous insistons sur la nécessaire prise en compte de l'interaction transport-urbanisation et que nous proposons un outil de simulation.

Conclusion du chapitre introductif

En économie des transports comme dans toute discipline scientifique, chaque modèle ne peut être défini que par rapport au phénomène modélisé et aux paradigmes auxquels il se réfère : cet ensemble permet de définir le champ d'application du modèle. Chaque modèle possède donc des aptitudes spécifiques, qui sont à mettre en rapport avec l'éventail des besoins d'évaluation de politiques de transports urbains. Cet éventail peut être ordonné selon deux dimensions ou plutôt deux portées, l'une spatiale et l'autre temporelle. La portée spatiale va du quartier ou de la zone jusqu'au niveau de l'agglomération ou de la région urbaine. La portée temporelle va du court terme (1 à 3 ans) au long terme (10 ans et au delà). Ces deux portées permettent d'ordonner les différents types d'études requises pour mener à bien une politique de transport : cela va, sans être exhaustif, des études de projet détaillé d'infrastructures de transport à court terme, aux études de simulation à long terme au niveau de l'agglomération. Il est clair qu'il n'existe pas de modèle à tout faire et que chaque type d'étude appelle un ou des outils particuliers. Il peut être reconnu que l'analyste est mieux doté en matière de modèles de court ou moyen terme, qu'il s'agisse des modèles d'affectation sur des réseaux ou de modèles de choix discret, qu'en matière de modèles de long terme.

Pendant ces trois dernières décennies, la modélisation du transport urbain a vu une graduelle incorporation et unification de différentes théories et méthodes, aboutissant à une structure plus cohérente et reflétant une compréhension plus approfondie de la situation réelle. L'émergence des modèles interactifs transport-urbanisation représente le point culminant des efforts menés ces dernières années.

Les déplacements urbains permettent de réaliser le programme des activités en des lieux différents de la cité. Ces déplacements assurent ainsi une certaine compatibilité entre un système de localisation inscrit sur le sol, et un système de pratiques et de relations sociales au sein duquel l'individu joue son rôle sous le poids de contraintes mais avec des degrés de liberté. Ils sont donc largement déterminés par les dynamiques interdépendantes de ces deux systèmes. La modélisation du système des déplacements urbains à long terme ne peut pas s'abstraire de la prise en considération de l'interdépendance entre le système des déplacements et celui des localisations. Ceci oriente ainsi notre problématique vers l'étude de l'interaction des transports urbains et du système d'occupation des sols. La trajectoire de recherche adoptée est la modélisation d'un outil de simulation interactif du système de déplacements visant à évaluer différentes politiques de transport en milieu urbain.

PARTIE 1. L'analyse des interactions entre système de déplacements et système de localisations

Chapitre 1. Le paradigme de l'analyse de la demande de déplacement

Introduction

Dans le chapitre précédent, nous avons vu de quelle façon les modèles de déplacements urbains ont évolué. Le présent chapitre a pour objet de présenter le paradigme de l'analyse de la demande de transport. Ce paradigme s'est construit progressivement notamment à partir des enseignements des études empiriques et des diverses démarches de modélisation. Il s'appuie sur la théorie microéconomique du consommateur. La modélisation des flux et la théorie du comportement du consommateur constituent deux corps de doctrine bien développés qui ont fait et font encore l'objet de nombreuses recherches. Quinet et Hamel (1984) ont menés une comparaison entre la modélisation

des flux de transport et la théorie du consommateur. Ils montrent que la modélisation des transports a évolué vers une meilleure intégration de la théorie du consommateur. Les développements dans la modélisation des transports se caractérisent par trois types de raisonnement. Le premier type est celui de l'imitation et de l'empirisme. Le deuxième type de raisonnement consiste en la théorisation de l'intervention de variables telles que le temps. Enfin, c'est dans le troisième type de raisonnement qu'on se rapproche le plus de la théorie du consommateur, c'est-à-dire que l'on cherche à maximiser l'utilité globale de l'utilisateur.

Dans la première phase de la modélisation, qui correspond de façon chronologique aux premiers modèles développés, entre autres les modèles conventionnels à quatre étapes, on a cherché simplement à mettre en jeu les variables dont l'intervention est naturelle, et cela sous des formes souvent empruntées à d'autres disciplines, mais sans qu'aucune théorie précise ne la justifie. Sur la base de cette approche empirique, les analystes se sont aperçus que le coût, paramètre fondamental de toute étude économique, ne suffisait pas à caractériser l'offre de transport ; des paramètres de qualité de service comme le temps de transport, la fiabilité de ce temps, le confort se sont révélés tout aussi importants. Plusieurs modèles se sont efforcés d'introduire tout ou une partie de ces paramètres. Ces modèles sont marqués par un effort pour faire intervenir l'ensemble des paramètres dont le bon sens et l'expérience indiquent qu'ils doivent jouer un rôle dans la détermination des flux de transport. Mais l'expression exacte de la relation dans laquelle ils rentrent, ainsi que la formulation précise des paramètres introduits sont marquées du plus grand empirisme. Les paramètres pris en compte sont ceux que l'on mesure le plus facilement. Ainsi, on ne s'est pas étonné qu'à côté de ce courant empiriste, se soient développées des réflexions plus abstraites visant à faire découler les modèles de trafic d'une certaine analyse des comportements des usagers fondée sur la théorie classique du consommateur. La première étape, selon Quinet et Hamel (1984), a consisté en la théorisation des variables d'offre autres que le coût monétaire. En effet, la théorie économique du consommateur fait jouer un rôle privilégié au prix. Mais on s'aperçoit vite, en matière de transport, de personnes surtout, que le prix n'est qu'un des attributs de l'offre ; et que certains de ces autres attributs jouent un rôle important. Ainsi, parallèlement à l'introduction empirique de ces attributs, on s'est efforcé d'analyser leur intervention sur le plan théorique. Le premier paramètre qui fit l'objet de réflexions fut le temps, c'est-à-dire la durée du transport. On l'introduit en ajoutant, dans le programme de satisfaction de l'utilisateur, une contrainte relative au temps dont dispose le consommateur pour effectuer ses consommations. Plus précisément, le problème auquel est confronté le consommateur est celui de la maximisation de son utilité, non plus seulement sous la contrainte de son revenu, mais aussi sous la contrainte de son temps. Des recherches théoriques ont conduit à définir la notion de coût généralisé de transport, combinaison linéaire des différentes disponibilités à payer les attributs du transport. Ces recherches ont débouché sur la définition des modèles logit et probit. Dans ces modèles, présentés brièvement dans le chapitre précédent (les modèles désagrégés), la décision de l'utilisateur résulte d'un processus d'optimisation. Mais cette théorie « *behaviouriste* » n'est pas parfaitement réalisée, ou plus exactement, ne se vérifie pas d'une manière déterminée dans la réalité. L'hypothèse fondamentale dans ces modèles est que l'utilisateur, mis en présence de plusieurs alternatives *i* choisit celle dont l'utilité est la plus forte. Comme les

utilités sont des variables aléatoires, on ne peut déterminer pour l'individu qu'une probabilité de choix de l'alternative i . Ces modèles représentent un progrès de conception certain par rapport aux modèles de la première génération. Ils permettent d'introduire explicitement et de manière exhaustive l'ensemble des attributs du transport autres que le coût. La structure de ces modèles résulte d'une certaine théorisation du comportement du consommateur. Enfin, le choix entre les alternatives de transport est explicité sur la base d'un raisonnement plausible des usagers. Au total, le pouvoir explicatif et la cohérence logique de ces modèles marquent un progrès sensible. Ils ne sont toutefois pas sans défaut, les conséquences de long terme d'une modification de l'offre et de l'environnement urbain échappent à ces modèles. Le caractère de la demande de déplacement en tant que demande intermédiaire n'est pas suffisamment pris en considération. Le transport n'est pas un but en soi, c'est un moyen pour exercer une activité. Quand on élargit ainsi le point de vue, on est amené à considérer que le comportement de l'utilisateur ne se limite pas à minimiser le coût généralisé d'un transport dont la décision a été prise antérieurement, mais de façon plus large, revient à maximiser l'utilité d'un ensemble d'activités dont le transport n'est qu'un élément.

Afin de présenter le paradigme de l'analyse de la demande de transport, il convient dans un premier temps de situer cette demande dans son contexte : le système des déplacements urbains (section 1). Ce système est complexe, notamment de par les relations qu'il entretient avec le système urbain. Ensuite, afin de pouvoir mener une analyse de la demande de déplacement, il est nécessaire préalablement d'en donner une définition précise. C'est l'objet de la section 2 qui souligne toute la complexité de la demande de déplacement. Aussi, certaines hypothèses simplificatrices doivent être posées afin de permettre l'analyse. Ces hypothèses entraînent des procédures de modélisation spécifiques. L'analyse de la demande de déplacements s'appuie sur les principes de la théorie micro-économique du consommateur même si elle s'en abstrait par certains égards du fait d'une certaine exigence d'opérationalité. Aussi, les grands principes de l'analyse micro-économique du comportement du consommateur seront rappelés, puis la façon dont cette analyse a été transposée à celle de la demande des déplacements sera exposée (section 3). Enfin, à partir de ces enseignements, les méthodes de modélisation des choix de la demande de transport seront présentées (section 4).

Section 1. Le système de transport urbain

11. Le système de transport urbain : un sous-système du système urbain

La vie d'une cité dépend de son système de transport et une économie urbaine en bonne santé nécessite que le transport soit fluide et efficace. Le transport, aussi bien de personnes que de marchandises, constitue un service sans lequel la ville ne pourrait pas vivre et échanger. La fonction transport tient ainsi une place essentielle dans les villes. Elle touche en effet directement à ce qui constitue l'essence même et la raison d'être des formes urbaines : la variété et la densité des occasions d'échange offertes au citoyen. Ainsi, si la facilité et la qualité de ces échanges urbains (travail, achats, loisirs, ...) dépend

de la richesse et de l'équilibre de la structure urbaine, elle est aussi conditionnée par l'efficacité du système de transport.

Lorsque l'on cherche à analyser le système de transport urbain, il convient de le replacer dans son contexte : la ville. Par analogie avec le fonctionnement du corps humain, le système de transport urbain peut être comparé au système sanguin et nerveux qui permet d'irriguer les différents lieux de la ville, de les mettre en relation. Ce système ne se caractérise pas seulement par un réseau de communication physique, mais surtout par des déplacements effectués par des personnes et des marchandises. Sa fonction fondamentale est l'échange. A l'instar de Bonnafous et Puel (1983), nous préférons utiliser le terme de « système de déplacements urbains ». Ces auteurs en donnent la définition suivante : « celui-ci est constitué tout à la fois des flux de biens et de personnes qui parcourent la ville et de ce qu'il convient d'appeler le système de transport, qui en constitue le support » (Bonnafous, Puel, 1983, p.44).

Le système de déplacements est complexe. Pour l'analyser, il convient de poser quelques principes analytiques de base, de le conceptualiser. Manheim (1979) pose deux principes de l'analyse du système de déplacements :

1.

le système global de déplacement d'une aire urbaine doit être considéré comme un système unique, multimodal. C'est-à-dire que tous les modes doivent être considérés, tous les éléments du système de transport doivent être pris en compte (les personnes et les marchandises transportées, les véhicules employés, le réseau et les équipements), etc. De cette définition détaillée du système de transport, l'analyste doit limiter son objet aux éléments qui concernent plus directement ses objectifs. Cette procédure le conduit à considérer de façon explicite les hypothèses introduites en éliminant les éléments individuels d'un système fortement complexe et interrelié.

2.

Les considérations du système de déplacements ne peuvent pas être séparées des considérations du système social, économique et politique de l'aire urbaine. Manheim (1979) adopte une approche systémique du système de déplacement, à l'instar de Bonnafous et Puel (1983) et de Frybourg (1991). Le système des déplacements urbains est fortement interrelié au système socio-économique. Le lien transport-urbanisme marque la spécificité du système urbain. Le système de transport affecte la façon dont le système socio-économique évolue et change, ces changements dans le système socio-économique vont en retour induire des changements dans le système de transport. Cette interrelation est fondamentale pour Manheim, et lui permet de conceptualiser le système de déplacements par trois variables de base :

—

T, le système de transport ;

—

A, le système d'activités ;

F, la structure des flux dans le système de transport, c'est-à-dire les origines, les

destinations, les itinéraires, les volumes de marchandises transportées et les personnes en mouvement.

Manheim identifie trois sortes de relations entre ces trois variables (cf. figure 1-1).

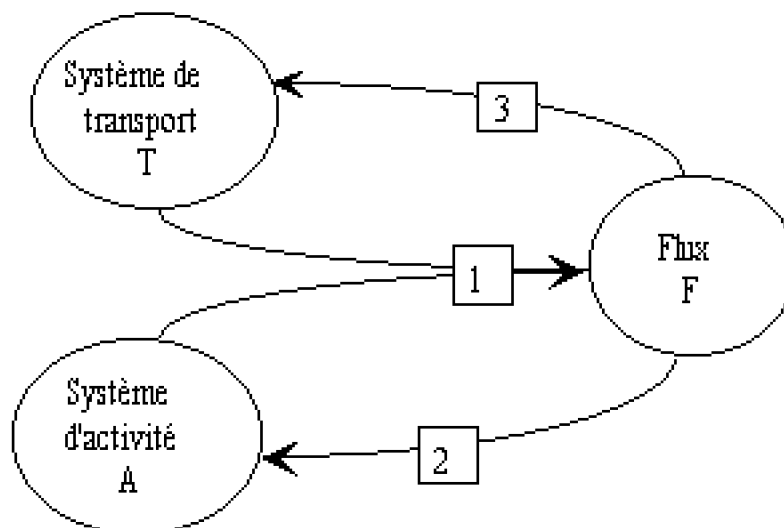


Figure 1-1. La conceptualisation du fonctionnement du système de transport par Manheim

Source : MANHEIM M. (1979) *Fundamentals of transportation systems analysis*, The MIT Press, Cambridge.

La relation 1 signifie que la structure des flux dans le système de transport est déterminée à la fois par le système de transport physique et par le système d'activités. La relation 2 indique que la structure des flux effective peut entraîner des changements dans le temps sur le système d'activités. La relation 3 exprime le fait que la structure courante des flux peut également entraîner avec le temps des changements dans le système de transport (en réponse aux flux actuels ou anticipés, les entrepreneurs et les gouvernements vont développer des nouveaux services de transport ou modifier les services existants).

Manheim souligne que le système d'activités symbolisé par A consiste en un ensemble de sous-systèmes, se chevauchant et étant en interrelation, tels que les structures sociales, les institutions politiques, les marchés du logement, *etc.* Le système de déplacement constitue d'ailleurs un sous-système de A. L'évolution du système d'activités est déterminée par un grand nombre de forces et de pressions. La dynamique interne de ce système est très complexe, et notre compréhension de ces dynamiques est encore très incomplète. Le transport joue un rôle dans l'évolution du système d'activités, mais excepté dans des situations spécifiques, il n'est pas le seul déterminant de cette évolution. Ainsi, comme le souligne Manheim, le développement des automobiles et celui des réseaux routiers rapides, n'ont pas entraîné à eux seuls la périurbanisation et la dispersion des aires métropolitaines. En effet, ce phénomène est fortement relié à la dynamique de croissance des revenus, aux changements des marchés de logement et d'emplois, *etc.* L'interrelation entre le système des déplacements et le système des activités semble cependant fondamentale pour comprendre le fonctionnement d'un tel système. Manheim conclut en affirmant que le transport doit être considéré comme une

technologie, un système d'éléments physiques géré par des organisations humaines pour faire déplacer les personnes et les marchandises.

Cette approche systémique du système de déplacement est reprise par Bonnafous et Puel (1983). Ces auteurs proposent une conceptualisation de la ville, et posent « l'hypothèse selon laquelle la ville peut être interprétée comme l'imbrication de trois sous-systèmes, dotés chacun d'une logique de fonctionnement et de transformation, mais qui s'articulent les uns avec les autres selon des relations complexes de causalité » (Bonnafous, Puel, 1983, p.44). Les trois sous-systèmes que ces auteurs considèrent sont : un système de localisation (qui renvoie au problème de l'utilisation des sols), un système de déplacement, et un système de pratiques et de relations sociales (qui renvoient au mode de fonctionnement de la société). Nous retrouvons l'approche de Manheim, avec un contenu plus explicite du système d'activités, qui est décomposé en deux sous-systèmes, le premier renvoyant davantage aux contraintes spatiales du système urbain, et le second, en quelque sorte, aux temporalités de l'activité urbaine.

L'analyse du système de déplacement revient en fait à étudier la formation des flux de déplacement, sa structure, ses déterminants. L'analyse systémique de Manheim permet de conceptualiser la formation des déplacements dans l'espace urbain. Les déplacements effectués résultent de la rencontre entre l'offre d'acheminement (les réseaux, les services accessibles) et la demande de circulation (qui dépend du système d'activités). Cet équilibre économique est une relation, directe, entre l'offre et la demande.

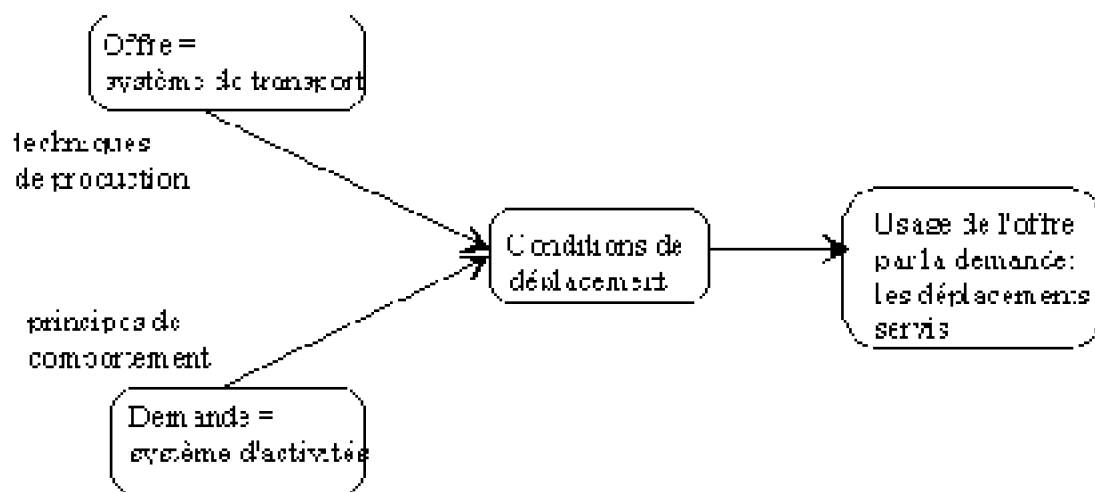


Figure 1-2. Représentation du système de transport : la confrontation demande et offre de transport

Source : Ministère de l'Équipement de l'Économie et des Finances, Direction de la prévision (1997).

La figure 1-2 met en évidence que les déplacements urbains sont le résultat de la confrontation entre une offre de transport, le système physique de transport, et une demande de déplacements.

Si l'offre de transport peut être immédiatement identifiée, la demande de transport, en revanche doit être explicitée. La demande de déplacement renvoie à l'expression de

comportements de choix de déplacement des individus. Elle est une représentation des comportements individuels de déplacement. Par ailleurs, elle est une demande dérivée dans le sens où le déplacement est désiré non pour lui-même mais est un moyen de se rendre en certaines localisations à une certaine période, et ce but est lui-même issu du désir de réaliser certains schémas d'activités. Ainsi, la demande de déplacement est conditionnée par le système d'activités. Les besoins de déplacements naissent des besoins d'échanges des individus dans la ville et du fait de la dispersion des lieux d'activités à travers la ville. A ce sujet, Vermot-Desroches (1994) souligne que les transports ne sont qu'une matérialisation des besoins d'interaction spatiale. La demande de déplacements est donc déterminée par des comportements d'activités des individus et renvoie donc à un ensemble complexe et spatialement varié d'activités telles que le travail, les loisirs, les achats et les résidences. La demande de déplacements est une demande dérivée, intermédiaire.

12. Les interrelations entre les sous-systèmes

Les interrelations entre les sous-systèmes urbains feront l'objet d'une présentation plus approfondie dans un prochain chapitre puisqu'il s'agit de l'hypothèse centrale de notre travail de thèse. Certaines caractéristiques de ces interrelations peuvent être d'ores et déjà indiquées. Nous avons mis en évidence précédemment que le système de déplacement ne pouvait être envisagé sans considérer qu'il s'agit d'un sous-système urbain, entretenant des interrelations avec le système d'activités. Il apparaît en effet que les changements que connaissent les villes ont d'importantes incidences sur les déplacements et l'offre de transport, lesquels affectent à leur tour la façon dont les villes évoluent. L'évolution de la structure urbaine a une incidence sur les transports. « Il est important de tenir compte du fait que les évolutions en matière de transport ne sont pas seulement le produit des choix effectués par les individus sur la manière de se rendre d'un point de départ A à un point d'arrivée B. La structure des origines et des destinations change elle-même constamment et exerce une forte influence sur les déplacements effectués et les modes choisis et par conséquent sur les évolutions elles-mêmes » (Webster, 1985). En retour, les modifications de l'offre de transport entraînent des transformations de la structure urbaine, c'est-à-dire ont des impacts sur les choix de localisation des individus et des activités. L'amélioration des systèmes de transport peut donc avoir potentiellement un impact sur les schémas de localisation par le biais de changements dans les niveaux d'accessibilité. Cependant, l'impact du système de transport sur les schémas d'activités est complexe et contingenté à un ensemble d'autres facteurs.

Section 2. La demande de déplacement : approche conceptuelle

La demande de déplacement est complexe car elle est multidimensionnelle et est reliée à d'autres dimensions économiques. Cette section est consacrée à la présentation de l'approche conceptuelle de la demande de déplacement en milieu urbain. Cette question contient une discussion sur la structure générale de cette analyse incluant ses objectifs, sa portée et ses limites. Avant de proposer des méthodes d'analyse de la demande de

déplacement, il est nécessaire de s'attacher à la définir précisément. Ce sera l'objet du paragraphe suivant.

21. La définition de la demande de déplacement

En termes micro-économiques, la demande de transport est le volume de déplacements susceptible d'apparaître pour chaque niveau de coût de transport. Cependant, la demande de déplacements ne peut pas se résumer à cette définition. Dans la politique de gestion de la demande de transport, le concept de demande traduit l'expression d'un besoin de transport qui dépasse la notion de trafic (Kanafani, 1983). La demande de déplacement peut être divisée en deux composantes :

- D'une part, elle est la manifestation de besoins de déplacement, ceux-ci étant l'expression d'une demande d'activités socio-économique. La demande de déplacements résulte donc d'une friction des activités économiques avec l'espace. Le flux de trafic, en revanche, ne résulte que de la confrontation entre cette demande et l'offre en infrastructures de transport. L'analyse de la demande de transport fait donc le lien entre la demande de transport et les activités économiques qui la génèrent. Les résultats de l'analyse de la demande de transport sont donc les relations entre la mesure de l'activité économique et la mesure de la demande de transport. L'objectif de l'analyse de la demande de transport est alors de comprendre les déterminants de la demande, la manière dont celle-ci réagit aux variations du contexte socio-économique et affecte l'évolution du volume de trafic.
- D'autre part, la demande de déplacements est le résultat de certains choix de transport permettant la réalisation du déplacement. Elle n'est donc pas seulement déterminée par le système d'activités, qui crée les besoins de déplacements, mais aussi par le système d'offre en infrastructures de transport qui détermine les choix de déplacement.

Ainsi, une distinction existe entre d'un côté ce qui motive les déplacements, c'est-à-dire les besoins, les obligations de s'engager dans des activités à l'extérieur du domicile, et d'un autre côté, les choix des caractéristiques des déplacements tels que la destination, le mode, l'heure de départ, et l'itinéraire. Ces deux composantes sont liées et sont conjointement les déterminants du comportement de déplacement observé. Le processus de la demande de déplacement peut être schématisé comme suit (Gärling, Laitila, Westin, 1998) :

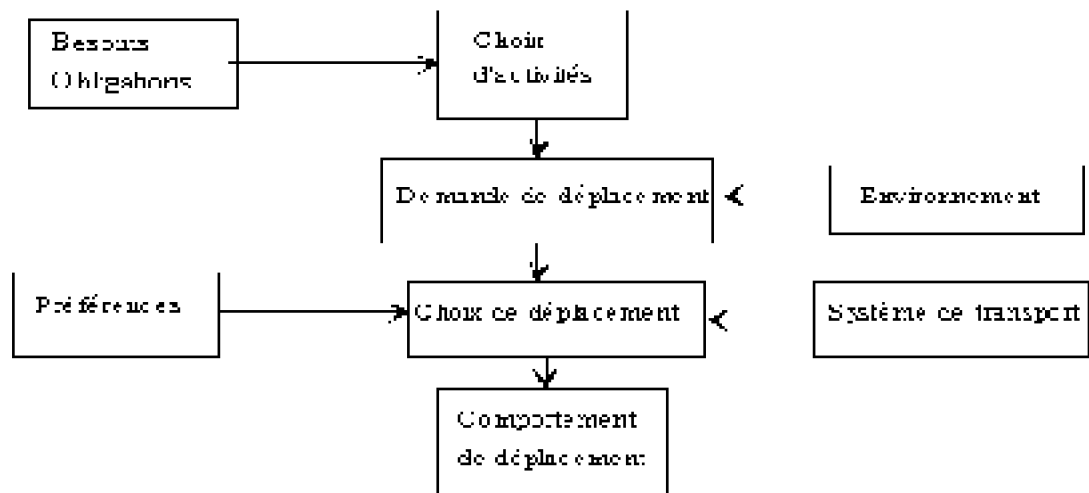


Figure 1-3. Schématisation des déterminants du comportement de déplacement

Kanafani (1983) propose également de schématiser le processus de la formation de la demande de déplacement.

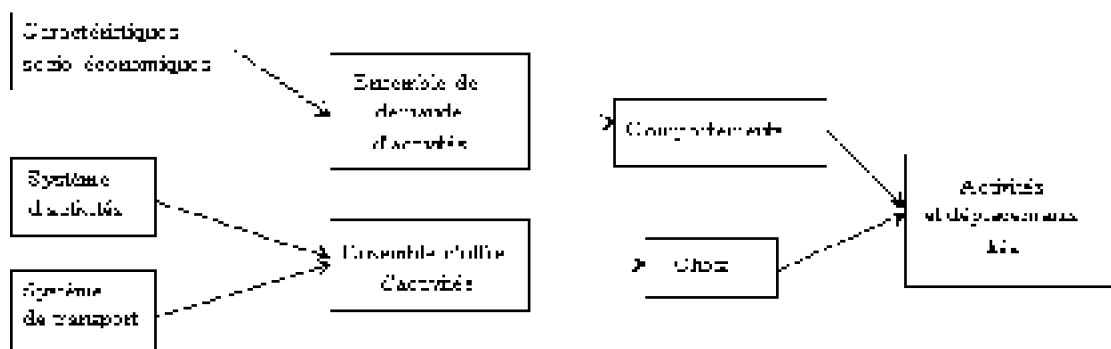


Figure 1-4. Schématisation du processus de la formation de la demande de déplacement

Ce schéma postule que la demande pour le transport urbain est directement liée à la demande d'activités urbaines et découle de celle-ci. Les activités telles que le travail, les achats, les affaires personnelles, les activités récréatives sont choisies dans un ensemble appelé « ensemble de demande d'activités » qui dépend des caractéristiques socio-économiques de l'individu ou du ménage (taille du ménage, revenu, nombre de personnes employées). La réalisation des besoins dépend de la disponibilité des opportunités pour les accomplir. Dans un sens général, la disponibilité des opportunités n'est pas seulement mesurée par la seule existence des activités, mais par leur présence à une certaine distance ou coût de transport. Ainsi, l'ensemble d'offre d'activités est défini sur la base des schémas d'occupation des sols urbains et des caractéristiques du système de transport.

Le besoin de déplacement est le résultat des interactions entre les activités sociales et économiques dispersées dans l'espace. L'analyse de la demande de transport fournit une structure pour l'estimation des besoins de transport et pour la prévision des volumes de trafic qui utiliseront les équipements de transport. A partir de la manifestation du besoin de transport, l'individu doit réaliser son déplacement étant donnée l'offre de transport.

Dans ce cadre, l'analyse de la demande de transport s'inspire de la théorie néoclassique du consommateur. L'individu va choisir la façon de se déplacer (la destination, le mode, l'itinéraire, l'horaire) afin de réduire au maximum ses coûts de déplacement. Ceux-ci sont aussi bien des coûts monétaires que des temps de déplacement, des temps d'attente, *etc.* Les hypothèses comportementales importantes de l'analyse de la demande sont relatives au processus de choix. On postule que la personne qui se déplace est face à une série de choix concernant les activités urbaines et les choix de transport impliqués.

22. L'analyse des choix de déplacement en milieu urbain

Dans l'analyse de la demande de déplacement urbain, le processus de déplacement est fondamentalement représenté comme un processus de choix au moyen duquel les voyageurs sélectionnent les différents attributs relatifs à leurs activités de déplacement. Les choix sont fortement liés aux choix des activités urbaines elles-mêmes. Le motif du déplacement représente la nature de l'activité urbaine en question, par exemple travail ou achat, la fréquence de déplacement, implique un certain niveau de participation au système d'activité, la destination du déplacement est elle-même le lieu de localisation de l'activité.

La plupart des analyses de la demande de déplacement sont structurées selon les différents motifs de déplacement. En d'autres termes, il est courant de supposer que les demandes pour différentes activités telles que les achats, les activités récréatives, *etc.* sont indépendantes. Cela est une hypothèse posée par égard de simplification. Pour chaque motif donné, les choix impliqués dans la décision de déplacement sont les suivants :

1.
Combien de déplacements réaliser pendant une période de temps donné ? (par exemple la moyenne de déplacements quotidiens)
2.
Quelle destination choisir pour chaque déplacement ?
3.
Quel mode emprunter ?
4.
Quel itinéraire choisir ?
5.
A quelle heure réaliser le déplacement ?

La compréhension de ce processus de choix et le succès de sa modélisation sont essentiels pour conduire l'analyse de la demande de déplacement et la définition d'une politique de transport pertinente. Le processus est très complexe puisqu'il implique un nombre de décisions relatives aux activités de déplacement qui sont évidemment interreliées. Empiriquement, il est virtuellement impossible de vérifier les hypothèses concernant la nature exacte de ce processus sans questionnaires détaillés des personnes qui se déplacent. Pour mener à bien l'analyse, certaines hypothèses simplificatrices

doivent être posées concernant la structure du choix.

221. Les hypothèses de base de la structure du processus de choix

Les deux questions majeures concernant la structure du processus de choix et conditionnant les hypothèses de travail sont :

1.
Les choix sont soit dépendants soit indépendants ;
2.
S'ils sont dépendants, ils sont soit effectués de façon simultanée soit de façon séquentielle.

2211. L'hypothèse de dépendance versus l'hypothèse d'indépendance des choix

La réponse à ces questions a des implications importantes sur la modélisation du processus de choix et sur les modèles de demande de transport résultants. Dans le cas de la première question, l'hypothèse d'indépendance implique que le choix de chaque attribut du déplacement est fait de manière indépendante des autres, par exemple le choix de la destination est indépendant du choix du mode. Cette implication conduit à une structure de modèles de probabilité de combinaison du mode et de la destination.

L'hypothèse de dépendance d'un autre côté implique que la valeur d'un attribut peut dépendre de la valeur des autres attributs du déplacement. Dans ce cas, une structure de probabilité conditionnelle est employée.

L'hypothèse d'indépendance est susceptible de n'être pas réaliste dans la plupart des cas de déplacements urbains. Par exemple, il n'est pas réaliste de supposer que le choix de la destination d'un déplacement est indépendant du mode choisi, parce que différents ensembles de destination peuvent être accessibles selon le mode retenu. La réciproque est également vraie. Il est également irréaliste de supposer que le choix de l'itinéraire est indépendant de la destination du déplacement ou du choix du mode. D'un autre côté, il peut être possible de supposer que pour les motifs de l'analyse de la demande les plus importants, les choix de long terme relatifs aux activités de déplacement sont effectués les premiers et sont indépendants des autres choix. Par exemple, la destination pour un déplacement pour le travail peut être sélectionnée, par choix ou non, indépendamment des autres attributs du déplacement, qui sont déterminés sur la base de la destination. Dans un tel cas, on peut dire que le choix de la destination est indépendant des autres choix, mais l'inverse n'est pas vrai. Il semble alors raisonnable de supposer que les choix ne sont en général pas indépendants mais qu'il existe une hiérarchie dans la dépendance allant des choix les plus importants à ceux de moindre importance.

Cela amène directement à la seconde question sur le fait que les choix sont effectués simultanément ou séquentiellement, une question sur laquelle aucun n'apporte de réponse conclusive.

2212. L'hypothèse de simultanéité versus l'hypothèse de séquentialité des choix

L'hypothèse de choix simultané est conceptuellement la plus générale dans le sens où elle reconnaît la possibilité que les attributs de transport de toutes les alternatives disponibles des déplacements affectent le choix de tous les autres. Cependant, cette hypothèse implique que les voyageurs prennent en considération tous ces facteurs pour toute décision de déplacement. Dans les modèles multimodaux de transport complexes, le nombre de possibilités de combinaisons des alternatives et de leurs attributs peut être tellement élevé qu'il excède les limites réalistes du pouvoir de discrimination. Dans de tels cas, les processus de décisions simultanées deviennent extrêmement difficiles, si ce n'est pas impossible.

L'hypothèse de séquentialité, d'un autre côté, implique qu'il existe une certaine hiérarchie parmi les choix, les choix les plus importants étant effectués en premier. Deux facteurs interviennent pour que cette hypothèse soit plus réaliste et susceptible d'être plus proche du processus de décision du voyageur.

le premier facteur concerne l'opposition voyageurs - non voyageurs, ou voyageurs captifs *versus* voyageurs non captifs. Cette situation est liée à une situation où un voyageur n'a pas le choix au regard d'un attribut particulier. Par exemple, un voyageur pour lequel une automobile n'est pas disponible, et qui provient d'une zone où la seule alternative est le bus, n'a qu'un faible choix en matière de choix du mode de déplacement.

le deuxième facteur qui détermine la hiérarchie dans la prise de décision est relatif aux décisions de long terme s'opposant aux décisions de court terme. Pour le motif de déplacement travail, en particulier, le choix de la destination est une décision de long terme qui n'est pas susceptible de se modifier d'un jour à l'autre. Cependant, d'autres attributs du déplacement travail tels que le choix du mode ou de l'itinéraire peuvent être modifiés à plus court terme. Dans un tel cas, on peut dire qu'une hiérarchie existe dans laquelle le choix de la destination vient en premier lieu et est suivi par le choix des autres attributs du déplacement, et ceux-ci sont effectués de façon conditionnelle au choix de la destination. Ces deux facteurs sont des conditions majeures des postulats de la théorie du comportement de déplacements urbains. La plupart des voyageurs prennent des décisions de déplacement qui sont d'une manière ou d'une autre contraintes.

En outre, la hiérarchie concernant l'échelle temporelle des choix de déplacement est également présente dans la plupart des déplacements urbains, et pas seulement sur les déplacements pour le travail. Par conséquent, les hypothèses de l'existence d'une hiérarchie et de la séquentialité des décisions de déplacement contiennent un attrait comportemental. Cependant, la difficulté analytique qui est posée par cette hypothèse est la question de savoir quelle séquence adopter pour modéliser les déplacements urbains.

Cette question a été l'objet de nombreux débats dans l'analyse du transport urbain. La teneur de ce débat est polémique, car s'il est difficile de savoir quelle séquence poser dans l'analyse, on doit reconnaître qu'aucune séquence particulière ne prévaut. En outre, il est extrêmement difficile de stratifier les déplacements urbains en catégories pour lesquelles il existe des séquences particulières.

Ces différentes hypothèses de travail aboutissent à des approches distinctes dans la façon de modéliser la demande de déplacements urbains.

222. Deux approches de base de la modélisation de la demande de déplacement urbain

Il existe deux approches de base pour modéliser la demande de déplacements urbains (Kanafani, 1983) :

1.
L'approche directe,
2.
L'approche de modèle de choix structuré.

La première approche implique une application directe des concepts de modélisation de la demande micro-économique. La seconde reconnaît la multiplicité des choix disponibles pour la personne qui décide de se déplacer, et implique la structuration d'une série de modèles de choix et la combinaison de ceux-ci pour prévoir le nombre total de déplacements de différents types. Au total, ces deux approches conduisent au même résultat, parce qu'elles ont le même objectif : prévoir le nombre de déplacements effectués dans une aire urbaine comme une fonction des caractéristiques de demande et d'offre. Ces deux approches peuvent être appliquées au niveau individuel (désagrégé) et au niveau du marché (agrégé).

2221. L'approche directe

Une fonction de demande est posée par hypothèse comme étant la relation entre le nombre de déplacements effectués par un individu et l'ensemble des variables de demande et d'offre. En transport urbain, il est nécessaire de spécifier les nombreux attributs du déplacement dans l'objectif de sélectionner les variables appropriées de demande et d'offre. Les attributs suivants doivent être identifiés : le motif, l'origine, la destination, le mode, l'itinéraire, l'heure de la journée. Etant donné cela, en général, des élasticités-croisées peuvent exister entre la demande de déplacement et les différents attributs.

Considérons X_{ijmrt}^p le nombre de déplacements effectués par un individu pour une période de temps donnée pour un motif p , à partir d'une origine i à une destination j , par le mode m , la route r , et à l'heure de la journée t . La fonction de demande sera alors :

$$X_{ijmrt}^p = X(D^p, S_{ijmrt}) \quad (1-1)$$

où D^p est le vecteur de variables de demande pour le motif p , S_{ijmrt} est le vecteur de variables d'offre pour les attributs m, i, j, r et t .

Notons que si toutes les élasticités-croisées sont présentes dans le modèle, alors le nombre de variables peut être très élevé. Si il existe I origines possibles, J destinations, M modes, R routes et T périodes de temps, et si il y a, par exemple, d variables de demande pour chaque motif de déplacement et s variables d'offre, alors le nombre total de variables dans la fonction de demande pour chaque motif de déplacement sera $d + sIJMRT$. Le nombre de paramètres du modèle devrait être au moins aussi élevé. Ceci amène à des situations difficilement gérables. Pour cette raison, il est courant d'effectuer des simplifications en supposant fixées plusieurs élasticités-croisées dans le modèle, ce qui conduit à réduire le nombre de variables. Notons que dans l'exemple de l'équation précédente, une telle simplification est déjà posée à savoir, l'élimination des élasticités-croisées de la demande pour les motifs de déplacement. Si toutes les élasticités-croisées sont éliminées, alors un modèle simple est obtenu comme suit :

$$X_{ijmrt}^p = X(D^p, S_{ijmrt}) \quad (1-2)$$

Cela, cependant, ne représente pas une économie considérable dans la complexité et l'extension de l'effort de modélisation de la demande. Pour ce faire, il faut au moins qu'une hypothèse supplémentaire soit posée, à savoir, que les formes fonctionnelles de tous ces modèles soient identiques. Sans cette hypothèse, il serait nécessaire de construire et de calibrer un modèle de demande de façon séparée pour chaque ensemble d'attributs, aboutissant encore à un très grand nombre de modèles pour lesquels les données sont usuellement non disponibles, particulièrement au niveau individuel. Des simplifications supplémentaires peuvent être réalisées en agrégeant les déplacements sous un ou plusieurs attributs. Par exemple, il est courant de construire des fonctions de demande pour les déplacements sur toutes les périodes de temps, éliminant ainsi l'indice t de , et de traiter les routes de façon agrégée, éliminant ainsi l'indice r dans la fonction de demande. Les déplacements ainsi estimés sont alors distribués parmi les itinéraires disponibles en utilisant un modèle d'affectation du trafic. Cette approche implique que la demande totale pour les déplacements n'est pas élastique par rapport aux attributs qui ont été éliminés.

2222. L'approche de choix séquentiels

Le modèle direct de demande présenté dans le précédent paragraphe implique un processus de choix simultané dans lequel le nombre de déplacements X_{ijmrt} est décidé par la personne qui se déplace sur la base de tous les attributs de toutes les alternatives simultanément. Des simplifications peuvent être réalisées conduisant à supposer que le processus de choix est séquentiel et son analyse peut donc être segmentée.

Le nombre de déplacements peut être décidé dans un premier temps, il s'agit de la génération des déplacements, puis les autres attributs sont alors sélectionnés tels que la destination, le mode, l'itinéraire. Ces simplifications du modèle direct de demande reflètent le postulat de l'existence d'un processus de choix séquentiel dans les comportements de déplacement. L'approche séquentielle de choix est une tentative pour

modéliser explicitement les processus de choix qui ont lieu lorsque l'on prévoit X_{ijmrt} . En dépit du fait que différentes séquences peuvent être supposées pour le processus de choix de déplacement, il existe deux façons par lesquelles le processus peut être modélisé. Ces deux méthodes diffèrent sur la façon de modéliser le nombre total de déplacements. Dans la première méthode, un modèle de génération de déplacement est défini en premier lieu. Les déplacements générés X_i^p , sont alors distribués parmi les choix de destination, du mode et de l'itinéraire disponibles. Cette méthode est à l'origine de nombreux modèles tels que les modèles du *Urban transportation Planning System* (UTPS). Nous retrouvons ainsi l'approche adoptée par les modèles à quatre étapes (cf. chapitre introductif). Soit la séquence de déplacement suivante : génération, destination, répartition modale et affectation. Pour simplifier cette illustration, le choix de l'heure de la journée et l'indice du motif sont ignorés. Le processus est alors le suivant :

$$X_i = X_i(D_i) \quad (1-3)$$

Avec X_i : le nombre de déplacements de la zone i , D_i : les caractéristiques de la zone i .

Les déplacements ainsi générés sont distribués parmi les destinations disponibles selon un modèle de distribution qui fournit la proportion de déplacement $p(j)$ qui est réalisée à chaque destination j :

$$X_{ij} = X_i \cdot p(j|i) \quad (1-4)$$

Le modèle de distribution des déplacements $p(j|i)$ répartit les déplacements X_i parmi les destinations selon l'attraction relative de chacune et les valeurs de certaines mesures agrégées d'offre concernant tous les modes et les itinéraires. Les déplacements d'échange entre origine et destination X_{ij} sont alors distribués parmi les modes disponibles (m) sur la base d'un modèle de choix du mode qui donne la proportion de déplacements effectuée avec chaque mode disponible en fonction des attributs d'offre de chaque mode. Ensuite, les déplacements sont répartis entre les itinéraires (r) possibles.

$$X_{ijm} = X_{ij} \cdot p(m|i, j) \quad (1-5)$$

puis

$$X_{ijmr} = X_{ijm} \cdot p(r|i, j, m) \quad (1-6)$$

L'inconvénient majeur de cette méthode résulte de l'implication que la demande totale de déplacement n'est pas élastique par rapport aux attributs du système d'offre et que les déplacements sont générés sur la base de variable de demande uniquement. Les procédures UTP forcent un nombre de déplacement généré à pénétrer dans le réseau de transport urbain. Des tentatives de correction ont été effectuées soit en incorporant des mesures agrégées d'offre dans le modèle de génération, soit en introduisant une rétroaction qui permette de modifier les taux de génération de déplacement sur la base de l'offre de transport.

L'approche alternative pour modéliser la demande de déplacement par une méthode de choix séquentiels est de renverser la séquence de modélisation et d'utiliser un ensemble de modèles de choix conditionnels. A chaque étape de la séquence, le modèle de choix conditionnel fournit un moyen d'obtention des caractéristiques attendues de l'offre pour être utilisé dans le modèle de choix de l'étape suivante. Finalement, le modèle de génération de déplacement est modélisé sur la base de la confrontation des variables de demande et des variables d'offre.

Après avoir défini ce que l'on entendait par demande de déplacement et d'en avoir proposé une approche conceptuelle, la section suivante rappelle les fondements théoriques de l'analyse de la demande de déplacement.

Section 3. Les fondements théoriques de l'analyse de la demande de déplacement

Avant d'aborder le problème spécifique de l'analyse de la demande de déplacement, un bref rappel sur la théorie micro-économique de la demande du consommateur est effectué, insistant particulièrement sur ses hypothèses. Ceci doit permettre de présenter par la suite dans quelle mesure cette approche est adaptée à l'analyse du comportement du voyageur, et quels sont les éléments à modifier.

31. La théorie micro-économique de la demande du consommateur

Dans la théorie micro-économique, la demande est approchée à deux niveaux : au niveau de l'individu, faisant référence à la demande du consommateur ; à un niveau agrégé, faisant référence à la demande de marché. La dernière est obtenue simplement en agrégeant ou sommant toutes les demandes individuelles des consommateurs, bien qu'elle soit souvent étudiée directement au niveau agrégé sans se préoccuper des comportements individuels. Cette dichotomie est importante dans l'application de la théorie de la demande au transport : l'analyse de la demande individuelle peut être utile lorsque l'application traite de prévisions microscopiques des comportements de déplacements des individus dans un système de transport, et la demande agrégée de marché est utile pour prévoir le comportement du système total de transport de façon macroscopique. Cette distinction, fait souvent référence à l'opposition des modèles de demande de transport désagrégés et des modèles agrégés.

311. La demande du consommateur individuel

La théorie a pour but de comprendre et de caractériser les facteurs qui affectent le comportement de consommation. Dans un premier temps, les principales hypothèses du cadre théorique seront rappelées, puis le programme de maximisation sera présenté.

Le consommateur de la théorie micro-économique est habituellement présenté comme une entité choisissant parmi un ensemble d'options réalisables. Le problème du consommateur est celui du choix entre un ensemble de possibilités, ce choix étant fait selon une relation de préférence, compte tenu des ressources dont il dispose. Les choix

du consommateur portent sur des paniers de biens, c'est-à-dire sur des ensembles de biens divers. Le consommateur fait face à un ensemble C de consommations possibles, dont les éléments sont des paniers de biens, C_1, C_2, C_3 . Chaque panier de biens est composé de quantités (éventuellement nulles) des divers biens disponibles.

3111. Les préférences du consommateur

La première hypothèse concernant les préférences du consommateur est que ce dernier peut classer tous les paniers de biens possibles selon une relation de préférence. C'est-à-dire que l'on suppose que, quels que soient les paniers de biens C_1 et C_2 , le consommateur est toujours en mesure de dire s'il préfère l'un à l'autre ou s'il est indifférent entre les deux. Les préférences sont dites complètes. Une condition imposée à la relation de préférence du consommateur est une condition de cohérence : si le panier C_1 est préféré ou indifférent à C_2 et que C_2 est lui-même préféré ou indifférent à C_3 , alors C_1 sera préféré ou indifférent à C_3 . Cette propriété, dite de transitivité des préférences, traduit une certaine cohérence du consommateur, que l'on considère parfois comme caractéristique d'un comportement rationnel. Enfin, C est considéré comme préféré ou indifférent à lui-même quel que soit C . La relation de préférence est réflexive. Quand la relation de préférence définie sur l'ensemble des consommations possibles possède les trois propriétés précédentes (complétude, transitivité, réflexivité), on dit qu'elle définit un préordre complet. Cette structure de préférences s'applique aux biens qui sont substituables dans le sens où la consommation de l'un n'implique pas nécessairement la consommation d'un autre dans une proportion donnée. On distingue ainsi les biens substituables, et les biens complémentaires. En transport, certains parlent de choix entre déplacements en automobile et déplacements en bus comme des choix compétitifs, substituables, tandis que lorsque l'on envisage, par exemple, le transport aérien, les déplacements en avion et les déplacements d'accès à l'aéroport sont complémentaires.

3112. La fonction d'utilité

Les préférences sont caractérisées sans référence quelconque à un problème de mesurabilité. Cependant, à des fins de manipulation mathématique, les théoriciens ont recherché une fonction de l'ensemble des consommations dans \mathbb{R} qui aurait la propriété de transférer les comparaisons entre paniers vers des comparaisons entre nombres. C'est-à-dire que l'on cherche une fonction $U: C \rightarrow \mathbb{R}$ telle que si C_1 est préféré ou indifférent à C_2 , on ait $U(C_1) \geq U(C_2)$, quels que soient C_1 et C_2 . On dit que U est une fonction d'utilité qui représente les préférences du consommateur. Cependant, même si la fonction d'utilité fournit une appréciation chiffrée des préférences, elle n'est pas considérée pour autant comme cardinale. Ce qui compte c'est l'ordre des nombres et non leur valeur. Cependant, le fait que la relation de préférence définisse un préordre complet sur l'ensemble des consommations est insuffisant pour pouvoir trouver une fonction d'utilité représentant les préférences et il est nécessaire d'ajouter deux hypothèses supplémentaires. La première, dite de non-saturation, exprime l'idée que le consommateur préfère toujours le plus au moins. C'est-à-dire que devant deux paniers, $C_1 = (x_1, y_1, z_1, \dots)$ et $C_2 = (x_2, y_2, z_2, \dots)$, composés des mêmes quantités de biens à

l'exception du premier bien X pour lequel $x_1 \geq x_2$, le consommateur préférera le panier C_1 . La seconde est l'hypothèse de continuité. En utilisant la fonction d'utilité qui présente les préférences, on peut définir une courbe d'indifférence par l'ensemble des paniers de biens qui procure la même utilité au consommateur. Pour un même individu, il existe une infinité de courbes, chacune correspondant à un niveau de satisfaction différent. L'ensemble de ces courbes est appelé carte d'indifférence. Le consommateur étant rationnel, les courbes d'indifférence ne se coupent pas et, plus la courbe s'éloigne de l'origine, plus le niveau de satisfaction du consommateur est élevé. La carte d'indifférence exprime ainsi l'échelle des préférences du consommateur.

La fonction d'utilité dépend des quantités de biens du panier. Les marginalistes insistent sur le fait que l'utilité d'une quantité donnée d'un bien dépend de la quantité du même bien dont dispose déjà le consommateur. Le troisième verre d'eau ou le troisième manteau a moins d'utilité que le premier. Jevons, Menger et Walras représentèrent l'utilité du bien h par une fonction $U_h(x_h)$ de la quantité consommée de ce bien, fonction possédant une dérivée U'_h continue, décroissante et mesurant l'utilité marginale de cette dernière. L'utilité que le consommateur retire du complexe x entier est alors :

$$S(x) = \sum_{h=1}^I U_h(x_h) \quad (1-7)$$

$S(x_1, x_2, \dots, x_I)$ est la fonction qui représente les préférences du consommateur entre divers vecteurs x .

3113. Les contraintes du consommateur

Le consommateur dispose d'un revenu limité, et il doit acquérir ses consommations sur un marché dans lequel chaque bien h a un prix p_h bien défini. La valeur de x ne doit donc pas excéder le revenu R :

$$px = \sum_{h=1}^I p_h x_h \quad (1-8)$$

R et p_h sont des données exogènes.

3114. Le choix du consommateur

On peut traduire le problème du consommateur de la manière suivante : d'une part, il cherche un panier de biens qui lui procure une utilité maximale, le plaçant sur la courbe d'indifférence la plus « haute » possible. D'autre part, il est limité dans ses choix par son revenu et les prix des biens. Sans perte de généralité, on peut se restreindre à un ensemble de consommation composé seulement de deux biens X_1 et X_2 , de prix respectifs p_1 et p_2 . Ces prix sont ici une donnée pour le consommateur. Ainsi, si le consommateur achète les biens X_1 et X_2 en quantités respectives q_1 et q_2 , il a dépensé $p_1 q_1 + p_2 q_2$. Quant à la limitation due à son revenu R , elle se traduit par le fait que sa dépense ne peut dépasser ce revenu. D'après l'hypothèse de non-saturation,

le consommateur a toujours intérêt à dépenser tout son revenu. Sa contrainte de budget s'écrit donc $p_1 q_1 + p_2 q_2 = R$. Cette relation entre les quantités consommées respectives q_1 et q_2 définit une droite, appelée droite de budget. La solution au problème de maximisation de l'utilité du consommateur sous contrainte des prix et du revenu consiste à rechercher la courbe d'indifférence qui soit tangente à la droite de budget. Cela permet de déterminer le choix optimal du consommateur, c'est-à-dire celui qui procure la plus grande utilité possible. Le programme de maximisation du consommateur s'écrit de la façon suivante :

Maximiser

$$U(q_1, q_2) \quad (1-9)$$

sous la contrainte

$$p_1 q_1 + p_2 q_2 = R \quad (1-10)$$

On peut résoudre ce programme en faisant appel au multiplicateur de Lagrange associé à la contrainte de revenu, que l'on écrit sous la forme :

$$R - p_1 q_1 - p_2 q_2 = 0 \quad (1-11)$$

Le panier optimal $\bar{Q} = (\bar{q}_1, \bar{q}_2)$ doit annuler les dérivées du Lagrangien :

$$L(q_1, q_2) = U(q_1, q_2) + \lambda (R - p_1 q_1 - p_2 q_2) \quad (1-12)$$

soit

$$L'_{q_1}(\bar{q}_1, \bar{q}_2) = U'_{q_1}(\bar{q}_1, \bar{q}_2) - \lambda p_1 = 0 \quad (1-13)$$

$$L'_{q_2}(\bar{q}_1, \bar{q}_2) = U'_{q_2}(\bar{q}_1, \bar{q}_2) - \lambda p_2 = 0 \quad (1-14)$$

En « passant à droite » les termes de λp_1 et λp_2 de ces équations, puis en faisant le rapport membre à membre des deux équations ainsi obtenues (en supposant qu'il n'y a pas de terme nul), le multiplicateur de Lagrange s'élimine et on retrouve la relation :

$$\frac{U'_{q_1}(\bar{Q})}{U'_{q_2}(\bar{Q})} = \frac{p_1}{p_2} \quad (1-15)$$

ou ce qui est équivalent :

$$TMS(\bar{Q}) = p_1/p_2 \quad (1-16)$$

La relation d'équilibre est décrite par l'égalité entre le rapport des utilités marginales (ou TMS) et le rapport des prix.

3115. La fonction d'utilité indirecte

On appelle $Q(P,R)$ la solution d'équilibre \bar{Q} pour marquer le fait qu'elle dépend du vecteur-prix $P=(p_1, p_2)$ et du revenu R du consommateur. On appelle fonction de demande d'un consommateur la fonction qui associe à un vecteur-prix P et à un revenu R le choix, ou panier optimal du consommateur. L'utilité maximum que peut obtenir le consommateur, au prix P et avec un revenu R est donnée par $U(Q(P,R))$ (puisque $Q(P,R)$ est par construction son choix en (P,R)). La fonction $V(P,R)$ définie par :

$$V(P,R) = U(Q(P,R)) \quad (1-17)$$

est appelée fonction d'utilité indirecte. Ce nom s'explique de la façon suivante (Guerrien, 1989). Cette fonction ne donne pas l'utilité procurée par un panier Q quelconque, mais « indirectement », celle que le consommateur peut atteindre aux prix P et avec le revenu R , à condition de faire un choix optimal. C'est donc l'utilité maximum qu'il est possible d'atteindre pour des prix et un revenu donnés.

3116. Les fonctions de demande du consommateur

Dans la description du comportement d'optimisation du consommateur, nous avons supposé que les prix et le revenu du consommateur sont des données, connues avant la prise de décision. Les inconnues à déterminer, qui sont l'objet de la décision, sont alors uniquement les quantités de biens que le consommateur souhaite obtenir. Ces quantités de biens dépendent donc des prix et du revenu. Ainsi, si on considère deux biens X_1 et X_2 , de prix respectifs p_1 et p_2 , et si on note R le revenu du consommateur, cela signifie que la quantité achetée q_1 de bien X_1 sera fonction de ces trois paramètres. Ce qui peut être écrit par Q_1^d désignant la fonction de demande pour le bien X_1 .

Pour analyser l'influence de chacun de ces paramètres, il est usuel de n'en faire varier qu'un seul à la fois, les deux autres restant fixes. On obtient ainsi trois fonctions de demande, reliant la quantité de bien au revenu des consommateurs, au prix du bien et au prix de l'autre bien. Les fonctions de demande expriment donc les choix optimaux du consommateur en fonction des prix unitaires des biens et du revenu dont celui-ci dispose. La demande comme relation entre une quantité et un coût peut être caractérisée en spécifiant une forme fonctionnelle. Il existe de nombreuses formes pouvant être prises par les fonctions de demande. Trois sont plus communément utilisées en pratique, particulièrement dans les applications en transport : la forme linéaire, la forme multiplicative, la forme exponentielle. Des formes hybrides combinant chacune de ces trois formes peuvent également être rencontrées dans les applications de transport.

Chacune de ces formes a une interprétation comportementale et bien qu'un calage empirique soit nécessaire pour la valider, le choix peut être fondé sur des postulats logiques relatifs aux relations causales impliquées. Ainsi, la fonction de demande linéaire implique que tous les facteurs qui affectent le trafic, tel que le revenu, les coûts et les temps de transport, aient des effets indépendants et additifs. La forme multiplicative implique en revanche que ces effets ne sont pas indépendants mais interagissent.

312. La demande de marché

Nous avons précédemment étudié la fonction de demande pour un consommateur individuel. En réalité, nous nous intéressons plus souvent au comportement d'un marché global, et non à un consommateur unique. Ceci est particulièrement vrai dans le cas où l'analyse de la demande de transport a pour objectif principal la prévision du trafic total. Le trafic généré par un individu particulier ou un ménage a un intérêt limité dans le domaine de la planification des transports. Par conséquent, une clé de passage doit être trouvée entre la demande individuelle et la demande du marché. Si tous les individus sur le marché ont la même fonction d'utilité, le même revenu ou le même budget, et ont à faire aux mêmes prix ou coûts, alors la demande du marché sera simplement une fonction individuelle multipliée par le nombre d'individus. Cette situation est bien sûr purement hypothétique. En effet, Kanafani (1983) souligne que si tous les individus dans le système sont similaires, il n'y a alors pas besoin d'une théorie, tout peut être prévu à partir de l'observation d'un individu unique. D'un autre côté, si tous les individus du système ont des fonctions d'utilité différentes, des budgets et des coûts différents, alors l'analyse de la demande devient inextricable, car elle doit reposer sur l'analyse d'un montant de données très important. Bien que cette situation est susceptible d'être plus proche de la réalité que la première, il existe probablement des groupes d'individus dont les caractéristiques sont suffisamment proches, par rapport à l'objectif de l'analyse de la demande, qu'ils peuvent être considérés comme similaires. Tous les consommateurs de ce groupe peuvent être représentés raisonnablement par un individu unique représentatif. Ainsi, afin de développer certaines des hypothèses fondamentales des fonctions de demande du marché, le marché est supposé être constitué de segments de demande, chacun d'entre eux étant homogène dans le sens où tous ses membres ont la même fonction d'utilité et le même budget. Nous supposons que les prix sont les mêmes pour l'ensemble du marché, bien que cette hypothèse puisse être levée dans l'objectif de prendre en compte les possibles discriminations entre segments ou les différences de perception des prix. En utilisant les mêmes notations que précédemment nous considérons la fonction de demande du marché comme la somme de fonctions individuelles de demande :

$$Q_i(R, p_1, p_2, \dots, p_n) = \sum Q_i^k(R^k, p_1, p_2, \dots, p_n) \quad (1-18)$$

où Q_i^k est la demande pour i du segment de demande k , R est le revenu total du marché.

La méthode la plus simple pour passer de la demande individuelle à la demande du marché est simplement de sommer les segments de demande.

32. L'application de la théorie micro-économique à l'analyse du comportement du consommateur en matière de choix de déplacement

La théorie du comportement micro-économique du consommateur ne peut être transposée sans certains aménagements et amendements à l'analyse des comportements des choix de déplacement. De nombreux débats se sont faits jour autour de la transposabilité de la théorie standard du comportement du consommateur à l'analyse du choix du consommateur en termes de déplacement. Un certain nombre d'auteurs reconnaissent que la théorie micro-économique du consommateur fournit une structure logique et cohérente très utile pour l'analyse de la demande de transport. Cependant, si de nombreux auteurs reconnaissent la puissance de cette théorie pour ancrer les fondements de l'analyse de la demande de déplacements, à l'instar de Kanafani (1983) « *Microeconomic demand theory provides a very useful framework for the analysis of transportation demand* » et de McFadden et Domencich (1975) « *the classical economic theory of consumer behavior provides a useful, logically consistent foundation for the empirical analysis of many aspects of individual demand* », tous ne tombent pas en accord sur le problème de l'application de cette théorie à l'analyse empirique de la demande de transport. Ainsi, Domencich et McFadden considèrent que cette théorie n'est pas directement applicable car « *there is a realm of behavior involving choice among discrete alternatives for which the traditional theory is not applicable. Demand of transport (...) is an example* ». Ces auteurs vont alors proposer d'analyser les choix de déplacements sur la base de la théorie des modèles de choix discrets (nous y reviendrons plus largement dans la section suivante). Toutefois, les différentes théories développées restent cohérentes avec le modèle du comportement du consommateur néoclassique.

Un certain nombre de difficultés se rencontrent lorsque l'on souhaite transposer la théorie du consommateur à l'analyse du comportement de choix de déplacement. Ces difficultés sont centrées sur plusieurs caractéristiques spécifiques de la demande de déplacement.

321. Les particularités de la demande de déplacement

Plusieurs spécificités de la demande de déplacement peuvent être soulignées :

1.

Comme nous l'avons déjà précisé auparavant, la demande de déplacement est une demande dérivée pour les activités sociales et économiques. Le « bien transport » est un bien complémentaire d'un bien principal, un bien intermédiaire. Pour un voyageur, le déplacement n'est un but en soi qu'en cas de promenade, mais le plus souvent, il permet de mener une activité au lieu de destination ; pour une marchandise, le transport est une facture, une étape dans le processus de production. Pour Small (1992), il est nécessaire de prendre en considération non pas la valeur propre du déplacement, mais plutôt de considérer un ensemble complexe et spatialement varié d'activités telles que le travail, les loisirs, les achats, et les résidences. En d'autres termes, les déplacements ou les activités de transport ne génèrent pas d'utilité de façon intrinsèque, ainsi certains auteurs en ont conclu que le modèle de maximisation de l'utilité n'était pas approprié.

Kanafani (1983) nuance ces propos en affirmant que cela est bien sûr vrai, car il est plutôt rare que le transport soit désiré pour lui-même, cependant, si on accepte que le déplacement permet à la personne qui se déplace de participer à une activité socio-économique qui génère une utilité et que le transport est simplement un moyen de surmonter la séparation spatiale entre l'origine et la destination du déplacement, alors le transport peut être considéré comme un coût d'opportunité qui doit être envisagé comme un composant du coût total de l'activité de consommation, ou n'importe quelle activité socio-économique impliquée. La fonction d'utilité doit alors être comprise comme une fonction du nombre de déplacements et des activités socio-économiques associées. Le coût de transport, ou plus généralement les attributs du système de transport, qui affectent les ressources qui doivent être engagées pour le déplacement, peuvent être introduits soit dans la fonction de coût, soit dans l'équation de budget, soit incorporés dans la fonction d'utilité. Kanafani souligne alors « *theoretically there is no reason why the framework of microeconomic demand theory cannot accomodate this adaptation of the utility maximisation model. In pratical terms the issue is less important since in most transportation applications the ad hoc approach is used for the determination of demand fonction* » (Kanafani, 1983, p. 51). Une importante distinction doit être faite concernant l'analyse de la demande de transport. Cette distinction porte sur la différence entre transport de marchandises et transport de personnes. Dans le cas du transport de personnes, la fonction d'utilité ne peut pas être réellement quantifiée, et l'approche *ad hoc* est commune. Les nombreuses idiosyncrasies des individus prenant des décisions de déplacements peuvent compliquer et obscurcir le modèle de maximisation de l'utilité, spécialement au niveau agrégé du marché. Les modèles de demande stochastiques sont par conséquent utilisés pour analyser la demande de transport des personnes. Dans le cas du transport de marchandises, le transport peut être considéré comme une part intégrante du processus de production dans lequel les inputs et les outputs sont spatialement séparés. La structure d'optimisation du processus de production fournit un outil performant pour traiter de la demande de transport de marchandises. Dans ce cas, un isomorphisme entre théorie de la demande et théorie de la production peut être utilisé pour améliorer l'interprétation de la fonction d'utilité. En ce qui concerne la demande de transport des voyageurs, l'identification des motifs est un moyen important pour stratifier la demande et pour adapter la notion pour qu'elle soit une demande dérivée plutôt qu'une demande pure.

2.

En transport, le bien faisant l'objet de la demande n'est pas consommable en quantités divisibles. Chaque individu est confronté à un choix entre un certain nombre d'alternatives qui sont mutuellement exclusives les unes des autres. Ce choix implique un conflit au niveau de l'individu qui résulte de l'obligation de choisir une seule action. Les individus sont ainsi confrontés à des choix discrets et non continus comme le traite la théorie standard du consommateur. Comme le souligne Manheim (1979) « *choices are considered to be among discrete objects than among discrete items or combinations of items : destination, mode, route and auto-ownership levels are naturally discrete...* » (Manheim, 1979, p.86).

3.

Les choix en matière de transport sont caractérisés par la valeur des caractéristiques des biens de transport plutôt que par leurs quantités. Le choix est réalisé à partir d'un ensemble non vide d'alternatives. L'environnement de l'individu définit l'ensemble universel d'alternatives. Parmi un ensemble universel discret, l'individu ne considère qu'un sous-ensemble appelé ensemble de choix. Il contient les alternatives qu'il peut réaliser. La réalisation d'une alternative sera définie par diverses contraintes de temps, d'argent, d'information... L'attractivité ou utilité d'une alternative est évaluée en fonction d'un vecteur de quantités des biens. Cependant, lorsque les alternatives sont hétérogènes, ce qui est le cas du transport, et lorsque les individus peuvent avoir différents ensembles de choix, il est plus naturel de caractériser chaque alternative par ses attributs plutôt que seulement par les quantités qui lui sont associées.

4.

La théorie économique fait jouer un rôle privilégié au prix. Mais, on s'aperçoit vite, en matière de transport, que le prix n'est qu'un des attributs de l'offre, et que certains de ces attributs jouent un rôle important, tel que le temps de transport, sa fiabilité, le confort, mais également la sécurité, la fréquence des transports en commun et la commodité de leurs horaires. Ainsi, le temps, c'est-à-dire la durée de transport doit être prise en compte.

5.

La théorie économique néoclassique suppose que l'individu dispose d'un pouvoir discriminant parfait qui lui permet de déterminer son action préférée de manière certaine et cohérente. Ceci revient à dire que l'individu n'hésite pas quant au choix à effectuer et répète celui-ci dans des circonstances identiques. Il s'agit du paradigme de rationalité de l'analyse néoclassique. Cette approche a été critiquée par de nombreux psychologues (Thurstone, 1927 ; Luce, 1959 ; Tversky, 1969 ; Strauss, 1979, etc.), pour qui le postulat d'un pouvoir discriminant parfait, et son corollaire, celui de la rationalité, ne constituent pas une description adéquate du comportement humain. Comme le remarque, par exemple, Tversky : « *when faced with a choice among several alternatives, people often experience uncertainty and inconsistency. That is, people are often not sure which alternative they should select, nor do they always make the same choice under seemingly identical condition* » (Tversky, 1972 in de Palma, Thisse, 1989, p.156). Ces comportements apparemment irrationnels amènent alors Tversky à considérer que pour prendre en compte les incohérences et incertitudes, le comportement de choix doit être envisagé comme un processus probabilistique. Nous verrons plus loin que les économistes ont une position radicalement différente afin de justifier que l'appréhension du choix en matière de transport ne se fasse pas de manière déterministe mais probabiliste, en ne remettant pas en question l'hypothèse fondamentale de la théorie néoclassique qui est la rationalité individuelle.

6.

Enfin, les difficultés cruciales que l'on rencontre lorsque l'on applique la théorie micro-économique de la demande au transport sont d'ordre méthodologique et doivent être traitées avec une spécification appropriée aux modèles de demande. Les comportements de transport, particulièrement dans le cas des déplacements de

personnes, sont sujets à des incertitudes plus nombreuses que les autres activités de consommation. En transport urbain, un ménage est face à un grand nombre de choix lorsque l'on considère les combinaisons possibles de localisation, de taux de mobilité, de mode, d'itinéraire, et d'horaire de déplacements. La quantification complète et la modélisation de tous ces choix ainsi que du processus de choix de déplacements est rempli de conjectures, d'incertitudes et d'hypothèses. La théorie micro-économique de la demande est loin d'être une théorie adéquate du comportement d'un système socio-technique tel que celui des transports.

322. Les extensions de la théorie micro-économique du consommateur : vers une transposition à l'analyse du comportement en termes de choix de déplacement

La théorie du comportement du consommateur ne peut être transposée sans certains aménagements et amendements à l'analyse des comportements de choix de déplacement. Les principales extensions sont relatives à la redéfinition de la fonction d'utilité, à l'introduction de la variable temps dans le modèle, à la considération de choix discrets, et enfin, à l'introduction d'un caractère aléatoire dans la fonction d'utilité.

3221. La fonction d'utilité définie en fonction des attributs du bien : la nouvelle théorie du consommateur, Lancaster (1966)

En matière de choix de déplacement, le choix ne se porte pas sur une quantité de bien à consommer mais sur les caractéristiques du bien. Lancaster (1966) part du constat de la non pertinence de la théorie traditionnelle du consommateur, qui ne permet pas de rendre compte de l'utilité des nouveaux biens ou des différences de qualité entre les biens. Il dénonce le fait que toutes les propriétés intrinsèques des biens soient négligées par la théorie. Face à cet échec de la théorie, il remarque au contraire l'importance, dans le comportement du consommateur, des qualités intrinsèques des biens. Cela le conduit à définir, en rupture avec la théorie traditionnelle, une nouvelle approche de la théorie du consommateur, dans laquelle les arguments de la fonction d'utilité ne sont plus des quantités de biens mais des caractéristiques. « L'innovation technique principale consiste à se détacher de l'approche traditionnelle selon laquelle les biens sont les arguments directs de l'utilité et à supposer au lieu de cela que ce sont les propriétés ou les caractéristiques des biens dont dérive l'utilité. Nous admettons que la consommation est une activité dans laquelle les biens, seuls ou en combinaison, sont des facteurs et dans laquelle le produit est une série de caractéristiques. L'utilité ou l'ordonnancement des préférences sont supposés classer des séries de caractéristiques et ne classer des séries de biens qu'indirectement, à travers les caractéristiques qu'ils possèdent » (Lancaster, 1996, *in* Goffette-Nagot, 1994). Enfin, Lancaster précise que « la structure (...) (interposée) entre les biens eux-mêmes et les préférences des consommateurs est, en principe au moins, de nature objective. C'est-à-dire que les caractéristiques possédées par un bien ou une combinaison de biens sont les mêmes pour tous les consommateurs, et étant donné une unité de mesure, se retrouvent dans les mêmes quantités, de telle sorte que l'élément personnel dans le choix du consommateur intervient seulement dans

le choix entre des ensembles de caractéristiques et non dans l'affectation des caractéristiques aux biens ». (Lancaster, 1966, *in* Goffette-Nagot, 1994). Cette transformation de la définition de l'utilité d'un bien par l'approche de la nouvelle théorie du consommateur est pertinente pour l'application de cette théorie au transport, et implique par exemple, que ce n'est pas un mode ou une route donnée qui est susceptible d'être choisie, mais leurs caractéristiques telles que le temps de déplacement, les coûts de déplacement. Ainsi, on admet qu'une action peut être décrite par un ensemble fini de caractéristiques non décomposables pour l'individu. La relation de préférence individuelle est maintenant définie sur les caractéristiques et non plus sur les actions.

3222. L'introduction de la variable temps dans la théorie du consommateur

Le temps est une contrainte primordiale dans les choix de déplacement. Ainsi, la durée de transport doit être introduite dans le modèle. La théorie du choix du consommateur qui incorpore la variable temps (théorie de l'allocation du temps) apparaît tout d'abord en micro-économie avec l'objectif d'expliquer l'offre d'heures travaillées par individu. Néanmoins, les recherches effectuées dans d'autres domaines ont souligné le besoin d'élaborer une théorie plus générale qui puisse expliquer d'autres aspects économiques de l'usage individuel du temps (Gonzalez, 1997). Les théories fondatrices de l'allocation du temps ont été développées par Becker (1965) et De Serpa (1971). Le problème auquel est confronté le consommateur est celui de la maximisation de son utilité, non plus seulement sous la contrainte de son revenu, mais aussi sous la contrainte de son temps.

Le modèle de De Serpa (1971, *in* Gonzalez, 1997) considère une fonction d'utilité qui dépend du vecteur x de consommations des différents biens, du vecteur t des temps alloués aux différentes activités potentielles, ainsi que de la variable t_w , le temps de travail :

$$U = U(x_1, \dots, x_i, \dots, x_n, t_1, \dots, t_i, \dots, t_n, t_w) \quad (1-19)$$

Chaque individu doit maximiser sa fonction d'utilité sous plusieurs contraintes :

une contrainte de budget, à laquelle on associe un multiplicateur de Lagrange λ , qui exprime le fait que les dépenses en biens de consommation (px) ne peuvent excéder le revenu disponible ($w.t_w + y$), w étant le taux de salaire horaire et y les revenus provenant de sources non-professionnelles, λ le multiplicateur représentant l'utilité marginale du revenu.

$$w.t_w + y \geq px \quad (1-20)$$

une contrainte de temps, associée à un multiplicateur de Lagrange μ , qui considère que la somme totale des temps alloués à chaque activité ne peut excéder le temps total disponible. Le 'multiplicateur μ est l'utilité marginale du temps pour une ressource rare.

$$\sum t_i + t_w \leq T \quad (1-21)$$

Des contraintes de temps minimum consacré à la consommation des biens et services, temps minimum envisagé comme proportionnel au montant du bien consommé. Ces contraintes sont associées au multiplicateur de Lagrange ψ_i , qui est l'utilité marginale de la réduction du temps nécessaire pour consommer i , et peut être interprétée comme l'utilité marginale du temps de déplacement économisé.

$$t_i \geq a_i x_i \quad \forall i \quad (1-22)$$

Une contrainte de temps minimum associée à la durée de la journée de travail t_w^0 , associée au multiplicateur de Lagrange Φ :

$$t_w \geq t_w^0 \quad (1-23)$$

Φ est l'utilité marginale obtenue si le montant minimum des heures travaillées est réduit à l'unité. Il s'agit de l'utilité marginale de la diminution des heures de travail minimum requises.

Ces deux dernières contraintes nous permettent de voir que dans ce modèle le montant du temps consacré à chaque activité découle aussi bien d'un choix individuel que d'une nécessité.

Le Lagrangien se définit de la façon suivante :

$$L = U(x, t, t_w) + \lambda (y - px) - \mu (T - \sum t_i - t_w) + \Phi (t_w - t_w^0) + \sum_i \psi_i (t_i - a_i x_i) \quad (1-24)$$

La solution au problème de maximisation conduit aux conditions du premier ordre suivantes :

$$\frac{\partial U}{\partial x_i} - \lambda p_i - \psi_i a_i = 0 \quad (1-25)$$

$$\frac{\partial U}{\partial t_i} - \mu + \psi_i = 0 \quad (1-26)$$

$$\frac{\partial U}{\partial t_w} + \lambda w - \mu + \Phi = 0 \quad (1-27)$$

$$t_i \geq a_i x_i \quad (1-28)$$

A partir de ces conditions, différentes mesures de la valeur du temps peuvent être obtenues, chacune d'entre elles représentant différentes hypothèses et concepts concernant le rôle de la variable temps. La division de l'équation (1-26) par λ (le multiplicateur de la contrainte budgétaire), aboutit à l'égalité suivante :

$$\frac{\partial U}{\partial t_i} \frac{1}{\lambda} = \frac{\mu}{\lambda} - \frac{\Psi_i}{\lambda}, \quad \forall i \quad (1-29)$$

L'expression $(\partial U / \partial t_i) / \lambda$ représente l'utilité marginale du temps consacré à la consommation du bien i rapportée au multiplicateur de la contrainte budgétaire, autrement dit, la valeur marginale du temps consacrée à la consommation du bien i .

La valeur du temps comme une ressource correspond au taux marginal de substitution entre temps et revenu (μ/λ) . Cette « valeur ressource du temps » indique ce que le consommateur est prêt à payer pour obtenir une augmentation de son budget temps total (T). Cependant, comme il est impossible d'accroître le temps total disponible des individus, cette définition de la valeur du temps ne prend pas beaucoup de sens à un niveau empirique.

Enfin (Ψ_i/λ) représente le taux marginal de substitution entre le temps passé à l'activité i et l'argent. Ce taux représente la propension des individus à payer pour économiser une unité de temps consacrée à l'activité i . Ce rapport peut s'exprimer comme suit :

$$\Psi_i / \lambda = \mu / \lambda - (\partial U / \partial t_i) / \lambda \quad (1-30)$$

Deux cas se présentent :

quand Ψ_i est égal à zéro, la contrainte de temps ne joue pas et l'individu consacre à l'activité i plus que le temps minimum. C'est le cas d'une activité de loisir. La valeur du temps épargné lors de la consommation de cette activité sera égale à zéro. Dans ce cas l'égalité devient $\partial U / \partial t_i / \lambda = \mu / \lambda$ et indique que l'utilité qui découle du temps alloué à la consommation du bien i est égal à la valeur du temps comme une ressource. Les biens qui correspondent à cette condition sont appelés les biens de « loisir pur ».

d'un autre côté, lorsque le niveau du temps dépensé à la consommation d'un certain bien est plus élevé que ce que le consommateur estime, le transfert de temps entre la consommation de ce bien vers celui d'un bien de loisir pur doit accroître le niveau d'utilité. Dans ce cas, Ψ_i/λ est la valeur du temps économisé dans l'activité i transférée à la consommation d'une activité de loisir pur. Ce concept est celui qui est usuellement compris en transport comme la valeur du temps.

Au total, l'introduction de la variable de temps dans l'analyse de la demande de déplacement est indispensable. Elle intervient aussi bien comme une contrainte que comme un attribut des alternatives de choix.

3223. L'extension de la théorie aux choix discrets

Les individus doivent fonder leurs choix de transport relativement à un ensemble d'actions mutuellement exclusives. Ce choix implique un conflit au niveau de l'individu qui résulte de l'obligation de choisir une seule action. Les individus sont confrontés à des choix discrets et non continus. Il s'agit des situations dans lesquelles, en prenant l'exemple de la consommation de trois biens, dont le bien composite et les deux biens de transport, le consommateur ne peut consommer que l'un des deux biens 1 et 2 ; c'est le cas du choix du transport. Alors tout se passe comme si l'individu avait deux fonctions d'utilité (Quinet, 1998) :

$$\begin{aligned} U_1 &= U(x_0, x_1, 0) \\ U_2 &= U(x_0, 0, x_2) \end{aligned} \quad (1-31)$$

et les fonctions d'utilités indirectes associées :

$$V_1(p_1, R) \text{ et } V_2(p_2, R) \quad (1-32)$$

Si les utilités U_1 et U_2 dépendent de paramètres de qualité q_1 et q_2 afférents aux biens 1 et 2, alors ces paramètres se retrouvent dans les fonctions d'utilités indirectes.

3224. Choix déterministes versus choix probabilistes : la théorie de l'utilité aléatoire

Dans le modèle standard, on suppose l'existence d'une fonction d'utilité (déterministe) représentant la relation de préférence à l'aide d'une fonction numérique U qui vérifie la propriété $U(a) > U(b)$ si et seulement si $a > b$. L'action optimale a maximise par conséquent . La théorie économique néoclassique suppose que l'individu dispose d'un pouvoir discriminant parfait qui lui permet de déterminer son action préférée de manière certaine et cohérente. En d'autres termes, si une personne est placée de façon répétitive devant un même ensemble d'alternatives, alors les choix seront les mêmes. L'individu dispose d'une fonction d'utilité qui lui permet de ranger les différentes actions de manière cohérente et non ambiguë et il choisit l'action qui maximise son utilité. Le processus de choix est donc de nature déterministe. Par ailleurs, cette hypothèse déterministe a été le

fondement de la plupart des modèles de demande au moins pendant la première décennie de leur développement. Les modèles de distribution des déplacements, les modèles de choix modal et la plupart des techniques d'affectation sont basés sur cette hypothèse que le processus de choix est un processus déterministe. Une autre hypothèse importante de simplification est celle qui consiste à considérer qu'il existe une règle de décision qui est utilisée par l'individu, et que cette règle est cohérente et stable.

L'observation des choix montre que même si les individus sont placés dans des situations identiques, des changements peuvent intervenir dans leurs préférences, et aussi modifier leurs choix. Ces derniers ne seraient pas uniformément rationnels, ni répétitifs. De ce fait, la théorie classique du consommateur ne permet pas d'étudier correctement le comportement des individus lorsqu'ils sont confrontés à un problème de choix discret. Il est nécessaire d'utiliser une méthode qui tienne compte de la dispersion des préférences individuelles, et de la variabilité des choix. Par conséquent, on lui substitue un mécanisme stochastique, fondé sur l'idée que le modélisateur ne possède pas l'information complète sur tous les éléments considérés par l'individu pour faire un choix.

De nombreux auteurs ont ainsi critiqué l'approche déterministe et ont été amenés à considérer que les choix ne sont pas déterministes mais probabilistes. En d'autres termes, lorsque l'individu doit choisir entre $a \in A$ et $b \in A$, on suppose qu'il y a une probabilité $P(a,b)$ de choisir a plutôt que b . La probabilité $P(a,b)$ est en générale différente de 0 et de 1. La question qui se pose alors tout naturellement est de déterminer l'origine de cette probabilité. S'agit-il du reflet des comportements individuels qui seraient intrinsèquement probabilistes ou bien la description en termes probabilistes traduit-elle l'incapacité du modélisateur à appréhender précisément les comportements individuels ? Il est coutume de distinguer deux familles de modèles selon la nature du mécanisme aléatoire qui gouverne le choix. Dans la première, on suppose que les règles de décision sont aléatoires et les utilités déterministes (il s'agit essentiellement des approches des psychologues et on sort du cadre de la rationalité du modèle néoclassique). Dans la seconde, on suppose que les règles de décision sont déterministes mais que les utilités sont stochastiques. Il s'agit de l'approche des économistes qui définissent l'utilité comme une variable aléatoire. Ceci fonde la théorie de l'utilité aléatoire. Cette dernière est l'adaptation de la théorie classique du consommateur au champ des choix discrets. Elle a été, à l'origine, formalisée par Manski (1977). Elle est en étroite relation avec la théorie du consommateur. Les incohérences observées, dans le comportement de choix sont supposées être le résultat d'observations déficientes de la part de l'analyste. Ainsi, l'individu est toujours supposé sélectionner les alternatives ayant la plus forte utilité. Cependant, les utilités des alternatives ne sont pas connues avec certitudes, et sont alors traitées comme des variables aléatoires.

On considère alors une population d'individus confrontés au même ensemble A d'actions et on cherche à déterminer le nombre d'individus qui choisissent une certaine action. Par construction, la population est partitionnée en différents segments relativement à divers facteurs socio-économiques (revenu, âge, profession,...). Chaque segment est supposé être constitué d'individus statistiquement identiques. Dans ce qui suit, nous allons considérer un segment donné que nous appellerons, par abus de langage,

population. Chaque individu est supposé avoir une fonction d'utilité déterministe U définie sur A . Toutefois, le modélisateur n'est en général pas à même d'observer toutes les caractéristiques des actions influençant le comportement de choix de l'individu. En outre, il n'a qu'une connaissance imparfaite de la fonction U . On décompose alors U en deux parties : d'une part, une fonction représentant la partie connue de l'utilité et qui est définie sur les caractéristiques observables des actions et d'autre part, une fonction ε qui représente la différence entre U et V . Dès lors pour $i=1, \dots, n$, on a :

$$U^i = V^i + \varepsilon^i \quad (1-33)$$

Quand bien même l'individu a un comportement déterministe, le modélisateur est incapable de la prévoir avec certitude puisque, par hypothèse, il ne connaît pas la fonction ε .

La probabilité qu'un individu pris au hasard choisisse i est donnée par :

$$P_A(i) = P(U^i = \max U^j) \quad i = 1, \dots, n \quad (1-34)$$

Ainsi les probabilités de choix sont construites à partir de la maximisation d'utilités stochastiques. La probabilité qu'un consommateur particulier choisisse une alternative particulière est donnée par la probabilité que l'utilité de cette alternative pour ce consommateur soit plus élevée que l'utilité pour le consommateur de toutes les autres alternatives. Le consommateur sélectionne l'alternative qui maximise son utilité. On ne sort pas du cadre de la rationalité du comportement standard et la recherche de la maximisation de l'utilité.

La théorie micro-économique a des connections claires avec le domaine des transports. En outre, le principe de maximisation de la théorie micro-économique est la pierre angulaire de la plupart des décisions des modèles dans ce champ. Des hypothèses comportementales théoriquement fondées sont essentielles pour le développement des modèles de choix de déplacement pouvant être utilisés pour prévoir la demande de déplacement. Ces hypothèses doivent être coordonnées aux développements des outils de modélisation statistiques et mathématiques.

Nous venons de présenter les principaux amendements nécessaires à l'adaptation de la théorie micro-économique standard du consommateur à l'analyse de la demande de déplacement. Ces amendements conduisent à proposer une approche quelque peu différente et aboutit *in fine* à la théorie des choix discrets, qui fonde les modèles désagrégés de déplacements (cf. Chapitre introductif). Cette approche est présentée de façon plus large dans la section suivante.

Section 4. L'analyse des choix de déplacement : la théorie des choix discrets

Le choix est un élément fondamental du processus de décision de déplacement. La personne qui se déplace est souvent face à un choix à prendre parmi un nombre de dispositions alternatives d'attributs du déplacement tel que la destination, le mode,

l'itinéraire. La théorie des choix discrets fournit une structure pertinente pour l'analyse de ces choix.

41. Le cadre général d'analyse des modèles de choix discrets

Le problème de base auquel est confronté l'analyse des choix discrets est la modélisation de choix à partir d'un ensemble d'alternatives mutuellement exclusives et collectivement exhaustives. Les modèles de choix discrets sont motivés par l'emploi de la théorie de l'utilité aléatoire sur des alternatives discrètes. Dans le modèle de l'utilité aléatoire, l'utilité d'un consommateur est une alternative qui est spécifiée comme une fonction linéaire des caractéristiques du consommateur et des attributs de l'alternative, plus un terme d'erreur. La probabilité qu'un consommateur particulier choisisse une alternative particulière est donnée par la probabilité que l'utilité de cette alternative pour ce consommateur soit plus élevée que l'utilité pour le consommateur de toutes les autres alternatives. Globalement, trois raisons premières suggèrent qu'un modèle de choix stochastique est préférable à un modèle déterministe :

1.
1a première est que les comportements des individus ne suivent pas toujours des règles rationnelles de choix et que les idiosyncrasies des comportements des individus ne peuvent pas être déterminées par un modèle déterministe ;

2.
La seconde est qu'il n'est pas possible d'introduire dans la fonction de choix toutes les variables qui peuvent influencer le choix. Si une telle fonction était possible, elle serait sans aucun doute trop compliquée pour être praticable ;

3.
La troisième raison est que l'individu type n'est pas certain de disposer d'une information parfaite sur le système de transport et les alternatives offertes. Ainsi, l'ensemble des alternatives peut être plus large que celui identifié par les analystes, ou la fonction $V(\cdot)$ peut contenir des variables sur lesquelles l'information perçue par le voyageur peut être absente ou incomplète.

Les modèles de choix discrets abordés ici utilisent le principe de la maximisation de l'utilité. Ainsi, l'individu prend sa décision en sélectionnant l'alternative qui lui procure la plus forte utilité. Les modèles opérationnels consistent à paramétrer les fonctions d'utilité en termes de variables observables indépendantes, et de paramètres inconnus, et leurs valeurs sont estimées à partir d'échantillon de choix observés, effectués par des individus confrontés à une situation de choix. Il est impossible de spécifier et d'estimer un modèle de choix discret qui parviendrait toujours à prévoir les alternatives choisies par tous les individus (Ben-Akiva, Lerman, 1985). C'est pourquoi le concept d'utilité aléatoire est adopté. Les utilités des alternatives sont considérées comme des variables aléatoires, ainsi la probabilité qu'une alternative soit choisie est définie comme la probabilité qui procure la plus forte utilité.

Les modèles de choix discrets ont été largement appliqués au domaine des transports. Dans les années 70, la recherche s'est particulièrement concentrée sur les

modèles de choix du mode de transport avec deux alternatives. Ensuite, il y a eu des applications sur les autres types de choix telle que la destination du déplacement, la fréquence du déplacement, la possession d'un véhicule, la localisation résidentielle.

Le paragraphe suivant a pour objet de présenter un rapide panorama des modèles probabilistes de choix discrets développés en économie et en psychologie. Après une brève discussion sur les fondements des modèles de choix discrets, les deux principales familles sont présentées, à savoir les modèles avec règles de décision stochastique et les modèles à utilité stochastique.

411. Fondements des modèles de choix discrets

La remise en question du processus déterministe de choix du consommateur a été soulevée par les psychologues et les économistes, de manière relativement distincte. En psychologie, l'approche probabiliste des choix est retenue en vue d'expliquer les incohérences observées dans le comportement humain. Si le choix d'une action est basé sur la représentation que l'individu s'en fait, on constate alors que cette représentation capte seulement certains aspects de l'action. Par exemple, lorsqu'un individu doit effectuer des choix répétés entre deux actions dans des circonstances similaires, il va choisir l'une ou l'autre action selon le cas. De même, lorsque l'individu est confronté à plus de deux actions, l'intransitivité dans les choix n'est pas rare. On remarque de telles incohérences même en l'absence de changements (observables) dans les goûts de l'individu ou de processus d'apprentissage. Il semble donc que les comportements réels de choix reflètent des fluctuations inhérentes au processus d'évaluation des actions. Dès lors, le modèle déterministe de choix n'apparaît plus comme satisfaisant. Des économistes comme Stigler et Becker (1977) ont souligné que les incohérences observées dans le comportement sont dues au fait que l'individu est attiré par des aspects spécifiques aux différentes situations de choix. Ainsi, si on était capable d'identifier les causes qui conduisent l'individu, selon les cas, à privilégier certains aspects plutôt que d'autres, on pourrait alors utiliser un modèle déterministe. Cependant, de Palma et Thisse (1989) souligne qu'une telle approche conduit souvent à intégrer un nombre tellement élevé d'états du monde qu'elle devient rapidement impraticable. Dès lors, il semble préférable d'employer des modèles de choix probabilistes.

De Palma et Thisse (1989) soulignent que le problème qui se pose est la détermination des hypothèses que doivent satisfaire les probabilités de choix, en sus de celles imposées par le calcul des probabilités. Un groupe d'hypothèses donne naissance à un modèle particulier de choix. Les modèles de choix discrets constituent un sous-groupe des modèles probabilistes. La question qui se pose est alors de déterminer l'origine de la probabilité. S'agit-il du reflet des comportements individuels qui seraient intrinsèquement probabilistes, ou bien la description en termes probabilistes traduit-elle l'incapacité du modélisateur d'appréhender précisément les comportements individuels ? Sur ce problème les avis divergent. Ainsi, Quandt (1956) explique que le processus de choix est intrinsèquement probabiliste, dans la mesure où le comportement d'un individu peut changer en fonction des facteurs extérieurs sans pour autant que ses préférences relatives aux caractéristiques se soient modifiées. Ce point de vue n'est pas partagé par tous. Pour Manski (1977), c'est le manque d'information qui conduit le modélisateur à

utiliser des règles de choix probabilistes. Celles-ci sont introduites « *not to reflect a lack of rationality in the decision maker but to reflect a lack of information regarding the characteristics of alternatives and/or decision makers on the part of the observer* » (Manski, 1977, in De Palma, Thisse, 1989). De Palma et Thisse (1989) considèrent que « ce point de vue apparaît comme parfaitement raisonnable puisque l'on sait que certaines caractéristiques influençant le choix de l'individu ne sont pas observables et/ou mesurables ». Enfin, De Palma et Thisse (1989) font remarquer que bien que les fondements de ces modèles de choix discrets fassent encore l'objet de discussions vigoureuses, les différentes approches débouchent souvent sur des modèles fort similaires.

Il est coutume de distinguer deux familles de modèles selon la nature du mécanisme aléatoire qui gouverne le choix. Dans la première, qui est celle des psychologues, on suppose que les règles de décisions sont aléatoires et les utilités déterministes. Dans la seconde, on suppose que les règles de décision sont déterministes mais que les utilités sont stochastiques.

4111. Les modèles avec règles de décision stochastique

Dans cette famille de modèles, l'utilité des différentes actions est déterministe mais le processus de choix est probabiliste. En d'autres termes, l'individu ne choisit pas nécessairement l'action qui lui assure l'utilité la plus élevée ; il a une probabilité (positive) d'opter pour les différentes actions possibles. Par conséquent, ces modèles expriment l'idée de « rationalité limitée » puisque les individus ne choisissent pas nécessairement ce qu'il y a de mieux pour eux-mêmes. Il existe deux principaux modèles avec règle de décision stochastique, à savoir ceux de Luce et Tversky. Luce pose au départ de son analyse un axiome relatif aux probabilités de choix. Le processus de choix n'est pas explicite. Tversky emprunte une démarche différente. Il suppose d'emblée l'existence d'utilités attachées aux différentes actions et décrit à partir de là le processus de choix de l'individu.

4112. Les modèles avec utilité stochastique

Les modèles avec utilité stochastique s'inscrivent davantage que les précédents dans la tradition de la théorie néoclassique des choix. Il existe deux principales interprétations de ces modèles. La première est issue des travaux de Thurstone et s'est imposée en psychologie des choix. La seconde est celle que les économistes ont retenue dans l'économétrie des choix discrets telle qu'elle fut initialement formulée par McFadden.

a) Le modèle de Thurstone

De Palma et Thisse (1989) soulignent que l'origine de la théorie de l'utilité stochastique remonte aux schémas d'explications des résultats d'expériences psychologiques. Dans ces expériences, on demande à un individu de comparer les intensités de stimuli d'ordre physique. Thurstone a proposé un modèle qui est devenu célèbre en psychologie pour rendre compte de la variabilité des réponses d'un individu à des stimuli identiques. Cet auteur en vient à supposer qu'un stimulus donné provoque une « sensation » ou un « état

physiologique » qui est la réalisation d'une variable aléatoire. Dès lors, la réponse d'un individu devant comparer deux stimuli résulte de la comparaison des réalisations de deux variables aléatoires, représentant les sensations provoquées par les stimuli à comparer. Pour les psychologues, le modèle de Thurstone est à interpréter de la manière suivante : « *the utilities are assumed to vary from moment to moment, and the decision process of the simple fixed rule of picking the alternative with the largest momentary utility* » (Edgell, Geisler (1980), in De Palma, Thisse, 1989). En d'autres termes, un individu est composé d'*homines oeconomicus* différents obéissant chacun aux axiomes de la théorie néoclassique. Selon l'état d'esprit de l'individu, un *homo oeconomicus* particulier est choisi et l'individu se comporte rationnellement en fonction de l'utilité déterministe correspondante. Plus précisément, les évaluations des actions de A sont considérées comme des variables aléatoires $U^1 + \varepsilon^1 \dots U^n + \varepsilon^n$ que l'individu compare afin de prendre sa décision, $U^1 \dots U^n$ étant des constantes et $\varepsilon^1 \dots \varepsilon^n$ des variables aléatoires. Si les ε^j sont distribués continûment et avec une moyenne nulle (sinon les moyennes sont ajoutées aux constantes u^j) et $P(\varepsilon^i = \varepsilon^j) = 0$ pour tout $i \neq j$, $i, j = 1, \dots, n$ les probabilités s'écrivent de la manière suivante :

$$\forall i = 1, \dots, n \quad P_A(i) = P[U^i + \varepsilon^i = \max_{j=1, \dots, n} (U^j + \varepsilon^j)] \quad (1-35)$$

Dans sa « loi des jugements comparatifs », Thurstone considère différentes hypothèses concernant les variables ε^j qui sont indépendamment et identiquement distribués (i.i.d.).

b) L'interprétation économique

L'approche des économistes, ou plus précisément des économètres, est conceptuellement très différente. Ils considèrent une population d'individus confrontés au même ensemble A d'actions et cherchent à déterminer le nombre d'individus qui choisissent une certaine action. Par construction, la population est partitionnée en différents segments relativement à divers facteurs socio-économiques (revenu, âge, profession,...). Chaque segment est supposé être constitué d'individus statistiquement identiques. Dans ce qui suit, nous allons considérer un segment donné. Chaque individu est supposé avoir une fonction d'utilité déterministe U définie sur A. Toutefois, le modélisateur n'est en général pas à même d'observer toutes les caractéristiques des actions influençant le comportement de choix de l'individu. En outre, il n'a qu'une connaissance imparfaite de la fonction U . On décompose alors U en deux parties : d'une part, une fonction V représentant la partie connue de l'utilité et qui est définie sur les caractéristiques observables des actions et, d'autre part, une fonction e qui représente la différence entre U et V . Dès lors, pour $i=1, \dots, n$, on a

$$U^i = V^i + e^i \quad (1-36)$$

Quand bien même l'individu a un comportement déterministe, le modélisateur est incapable de le prévoir avec certitude puisque, par hypothèse, il ne connaît pas la fonction e . De plus, on suppose que la population considérée est telle que ses membres diffèrent

les uns des autres par rapport aux seules caractéristiques et facteurs socio-économiques non observables. En conséquence, le modélisateur peut, au mieux, prédire le comportement d'un individu à une fonction de probabilité près. De ce fait, e^i est représenté par une variable aléatoire continue de moyenne nulle, notée ε^i , et U^i est représenté par l'utilité stochastique

$$U^i = V^i + \varepsilon^i, \quad i=1, \dots, n. \quad (1-37)$$

Dans cette expression, V^i reflète les préférences communes de la population tandis que ε^i exprime les variations de goûts à l'intérieur de cette même population, relativement à l'action i . Si $P(\varepsilon^j = \varepsilon^i) = 0$ pour tout $j \neq i$, alors la probabilité qu'un individu pris au hasard choisisse i est donnée par

$$P_A(i) = P(U^i = \max U^j), \quad \text{pour } i = 1, \dots, n. \quad (1-38)$$

Ainsi, les probabilités de choix sont construites à partir de la maximisation d'utilités stochastiques. Pour calculer $P_A(i)$, il suffit de connaître les fonctions de distribution des variables ε^j .

La justification de l'approche stochastique est, dans le cas présent, totalement différente des autres approches présentées précédemment. La règle de décision et la fonction de l'utilité de l'individu sont toutes les deux déterministes. L'incertitude trouve son origine dans le manque d'information du modélisateur. Plus précisément, Manski (1977) identifie quatre sources différentes d'incertitude :

1.
Des caractéristiques non observables. Le vecteur des caractéristiques affectant le choix de l'individu n'est que partiellement connu par le modélisateur. En outre, des facteurs dont l'individu lui-même n'est pas entièrement conscient peuvent influencer ses choix (rôle de l'inconscient).
 2.
Des variations non observables des utilités individuelles. Toute population d'individus implique une variabilité des préférences et le terme aléatoire aura par conséquent une variance qui croît avec l'hétérogénéité des préférences.
 3.
Des erreurs de mesure. La valeur des caractéristiques observables influençant les choix n'est pas connue avec une précision parfaite.
 4.
Des variables instrumentales. La fonction d'utilité V n'est en fait pas connue avec exactitude (des lois linéaires sont souvent retenues en pratique), ce qui constitue une source potentielle d'erreurs.
- Le modèle est d'autant plus satisfaisant que la population traitée regroupe des individus semblables et que la fonction d'utilité V intègre les principaux facteurs observables affectant les décisions individuelles.

412. Modélisation de la procédure de choix

La modélisation de la procédure de choix discrets consiste à associer à chaque alternative constituant l'ensemble étudié une utilité qui dépend des caractéristiques des individus et de l'alternative elle-même. On déduira, alors, pour chaque individu, la probabilité de choisir une alternative. L'individu vise à maximiser son utilité. Nous rappelons que l'utilité a deux composantes :

- une composante aléatoire qui est identique à la fonction d'utilité conventionnelle et qui représente le niveau d'utilité moyen mesurable que l'individu n attache à l'éventualité i ,

- une composante aléatoire représentant tout ce qui n'est pas mesurable quant à l'individu n , pour l'alternative i . Ce terme est fonction des préférences de l'individu pour l'alternative et des caractéristiques non mesurables de celle-ci. Si l'on suppose que la composante aléatoire entre dans la fonction d'utilité de façon additive, alors l'utilité d'une action i pour un individu n peut être exprimée comme :

$$U_{in} = V_{in} + \varepsilon_{in} \quad (1-39)$$

Où

- U_{in} est l'utilité de l'alternative i pour l'individu n ,

- V_{in} est la portion « observable », déterministe de l'utilité,

- ε_{in} est la portion aléatoire de l'utilité.

Dans l'objectif d'éviter une confusion, il est important de souligner que ce qu'on appelle utilité dans les modèles de choix discrets est en fait une fonction d'utilité conditionnelle indirecte qui introduit le rôle des contraintes.

La partie observable est supposée être une fonction des attributs de l'alternative X_i et des caractéristiques socio-économiques de l'individu (de son ménage), soit S_n . En particulier, il est typiquement supposé, pour des raisons de commodité analytique et de calage, que V_{in} est donnée par :

$$V_{in} = \theta_1 Z_{in1} + \theta_2 Z_{in2} + \dots + \theta_t Z_{int} = \theta Z_{in} \quad (1-40)$$

avec θ : vecteur de paramètres, θ_1 pour la constante s'il y en a une. Celle-ci représente les variables non incluses dans la modélisation.

$$Z_{in} = f(X_i, S_n) \quad (1-41)$$

ce que l'on estime est la probabilité qu'une alternative donnée, parmi un ensemble d'alternatives disponibles, sera celle qui aura une utilité maximum pour cet individu, et sera donc choisie.

Compte tenu de la forme de U_{in} , $U_{in} = V_{in} + \varepsilon_{in}$ et d'un ensemble d'alternatives C_n , la probabilité que l'alternative i soit choisie par l'individu n est donnée par P_{in} :

$$P_n(i) = P(U_{in} \geq U_{jn} \quad \forall j \in C_n; j \neq i) \quad (1-42)$$

ou

$$P_n(i) = P(V_{in} + \varepsilon_{in} \geq V_{jn} + \varepsilon_{jn} \quad \forall j \in C_n; j \neq i) \quad (1-43)$$

$$P_n(i) = P(\varepsilon_{jn} - \varepsilon_{in} \leq V_{in} - V_{jn} \quad \forall j \in C_n; j \neq i) \quad (1-44)$$

Si on peut estimer la distribution des termes aléatoires, l'équation précédente pourra être utilisée pour calculer la probabilité qu'un individu réalise tel ou tel choix. Une des hypothèses possibles est de supposer que les termes aléatoires sont distribués selon une loi normale. Cette hypothèse génère ce que l'on appelle une formulation probit. Une autre hypothèse est de supposer que les termes aléatoires sont distribués selon une loi de Weibull (cas particulier de la loi de Gumbel). Cette hypothèse génère une formulation logit.

42. Détermination des probabilités de choix

Dans un premier temps, les modèles de choix binaires sont présentés (logit et probit), puis les modèles de choix multinomiaux. Une présentation détaillée du modèle logit multinomial est proposé par la suite.

421. Les modèles de choix binaires

Dans ce paragraphe, nous considérons le cas spécifique où C_n contient exactement deux alternatives. La probabilité qu'un individu n choisisse i est :

$$P_n(i) = P(U_{in} \geq U_{jn}) \quad (1-45)$$

et la probabilité que l'alternative j soit choisie est :

$$P_n(j) = 1 - P_n(i) \quad (1-46)$$

Le développement d'un modèle de choix binaire peut être décomposé en trois étapes de base (Ben-Akiva, Lerman, 1985) :

la séparation de l'utilité totale en un composant déterministe et un composant aléatoire de la fonction d'utilité,

la spécification du composant déterministe,

la spécification du composant aléatoire.

En appelant U_{in} et U_{jn} les variables aléatoires, nous commençons à diviser chacune de ces utilités en deux parties comme vu précédemment :

$$U_{in} = V_{in} + \varepsilon_{in} \quad (1-47)$$

$$U_{jn} = V_{jn} + \varepsilon_{jn} \quad (1-48)$$

La probabilité que n choisisse l'alternative i est donnée par :

$$P_n(i) = P(U_{in} \geq U_{jn}) \quad (1-49)$$

$$P_n(i) = P(V_{in} + \varepsilon_{in} \geq V_{jn} + \varepsilon_{jn}) \quad (1-50)$$

$$P_n(i) = P(\varepsilon_{jn} - \varepsilon_{in} \leq V_{in} - V_{jn}) \quad (1-51)$$

A cette étape, il faut souligner que la spécification des niveaux absolus des utilités ordinales n'est pas pertinente, seule leur différence compte. Les modèles de choix binaires peuvent être spécifiés en tenant compte seulement de ces différences. Cependant, afin de conserver une cohérence avec les modèles pour lesquels la situation de choix se fait avec plus de deux alternatives, nous allons écrire chaque fonction d'utilité séparément, en conservant à l'esprit que seule leur différence compte en termes de probabilité de choix.

Le premier problème pour spécifier V_{in} et V_{jn} est de se demander : quels types de variables peuvent entrer dans ces fonction ? Pour chaque individu n , l'alternative i peut être caractérisée par un vecteur d'attributs Z_{in} . La seconde question concerne la forme fonctionnelle adaptée pour V . Dans la plupart des cas, on considère des fonctions linéaires. Enfin, la spécification des termes aléatoires conduit à considérer différents modèles statistiques de probabilités.

4211. Le modèle logit binaire

Le modèle logit binaire suppose que la différence $\varepsilon_n = \varepsilon_{jn} - \varepsilon_{in}$ soit distribué logistiquement selon :

$$F(\varepsilon_n) = \frac{1}{1 + e^{-\mu \varepsilon_n}} \quad \mu > 0 ; -\infty < \varepsilon_n < +\infty \quad (1-52)$$

$$f(\varepsilon_n) = \frac{\mu e^{-\mu \varepsilon_n}}{(1 + e^{-\mu \varepsilon_n})^2} \quad (1-53)$$

où μ est un paramètre d'échelle positif. Afin de donner une continuité avec le développement du modèle de choix multinomial, l'hypothèse que ε_n est logistiquement distribué est équivalente à poser que $\varepsilon_{in} - \varepsilon_{jn}$ soit indépendamment et identiquement distribué selon Weibull (cas particulier de la distribution de Gumbel). Sous l'hypothèse que ε_n soit logistiquement distribué, la probabilité de choix pour l'alternative i est donnée par :

$$P_n(i) = P(U_{in} \geq U_{jn}) \quad (1-54)$$

$$P_n(i) = \frac{1}{1 + e^{-\mu(V_{in} - V_{jn})}} \quad (1-55)$$

$$P_n(i) = \frac{e^{\mu V_{in}}}{e^{\mu V_{in}} + e^{\mu V_{jn}}} \quad (1-56)$$

Il s'agit du modèle logit binaire.

4212. Le modèle probit binaire

Si ε_{in} et ε_{jn} suivent chacun une loi normale de moyenne nulle et ont des variances σ_i^2 et σ_j^2 et une covariance σ_{ij} , alors $(\varepsilon_i - \varepsilon_j)$ suit une loi normale centrée de variance $\sigma^2 = \sigma_i^2 + \sigma_j^2 + 2\sigma_{ij}$. Cette loi normale centrée aboutit au modèle « probit » et :

$$P_n(i) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{V_i - V_j} \exp\left(\frac{-t^2}{2\sigma^2}\right) dt \quad (1-57)$$

La formulation plus légère du modèle logit par rapport au probit combinée au fait que les deux modèles ont des hypothèses très proches quant à la courbe de réponse et des performances identiques, conduit à l'adoption effective et généralisée du modèle logit (Raux, 1983).

422. Les modèles de choix multinomiaux

Ce paragraphe concerne le cas général où il y a un ensemble de choix, C_n , qui peut consister en plus de deux alternatives. Dans de tels cas, la dérivation de modèles de choix appropriés aux méthodes d'estimation devient considérablement plus complexe que pour l'analyse des choix binaires. En particulier, il n'est pas suffisant de spécifier la distribution univariée de la différence des aléas $\varepsilon_{jn} - \varepsilon_{in}$. En effet, il faut considérer la

distribution jointe complète des aléas. On suppose, pour que le problème puisse être étudié que l'analyste peut définir un ensemble C qui inclut tous les choix potentiels pour la population. C est l'ensemble universel des choix et J l'ensemble des éléments de celui-ci. Pour chaque individu, on peut considérer qu'il existe un ensemble de choix C_n qui peut être plus petit.

Etant donné que chaque individu a un ensemble de choix possibles noté C_n , on définit $J_n \leq J$ le nombre de choix possibles. Suivant le développement de la théorie de l'utilité aléatoire, la probabilité qu'un élément i dans C_n soit choisi par le décideur n est donnée par :

$$P_n(i) = P(U_{in} \geq U_{jn}, \quad \forall j \in C_n, j \neq i) \quad (1-58)$$

$$P_n(i) = P(V_{in} + \varepsilon_{in} \geq V_{jn} + \varepsilon_{jn}, \quad \forall j \in C_n, j \neq i) \quad (1-59)$$

$$P_n(i) = P(\varepsilon_{jn} \leq V_{in} - V_{jn} + \varepsilon_{in}, \quad \forall j \in C_n, j \neq i) \quad (1-60)$$

Un modèle multinomial de choix peut être dérivé étant donné les hypothèses spécifiques de la distribution jointe des aléas.

Une manière d'exprimer $P_n(i)$ est de réduire le problème du choix multinomial à celui d'un problème binaire. Pour ce faire, notons que la condition :

$$U_{in} \geq U_{jn}, \quad \forall j \in C_n, j \neq i \quad (1-61)$$

est en fait équivalent à :

$$U_{in} \geq \max_{\substack{j \in C_n \\ j \neq i}} U_{jn} \quad (1-62)$$

Ainsi, nous pouvons créer ce qui est en fait une alternative « composite » comprenant tous les éléments dans C_n autres i , et utilisons l'utilité de la meilleure alternative de ce composite afin de représenter le composite entier. Si U_{in} excède l'utilité de l'alternative composite, alors i est choisie, sinon, elle ne l'est pas. Ainsi,

$$P_n(i) = P \left[V_{in} + \varepsilon_{in} \geq \max_{\substack{j \in C_n \\ j \neq i}} (V_{jn} + \varepsilon_{jn}) \right] \quad (1-63)$$

peut également être aléatoire.

$$U_{jn} = \max_{j \in C_n, j \neq i} U_{jn}$$

Deux modèles multinomiaux sont fréquemment utilisés : le modèle logit et le modèle probit.

4221. Le modèle logit multinomial

Le modèle logit multinomial est obtenu en supposant que les composants aléatoires de la fonction d'utilité sont indépendamment et identiquement distribués selon une distribution doublement exponentielle (loi de Gumbel). Une variable aléatoire e suit une distribution de Gumbel de paramètre m et h si celle-ci s'exprime par la formule :

$$F(\varepsilon) = \exp\left[-e^{-\mu(\varepsilon - \eta)}\right], \quad \mu \geq 0, \quad (1-64)$$

et la loi de densité de Gumbel est :

$$f(\varepsilon) = \mu e^{-\mu(\varepsilon - \eta)} \exp\left[-e^{-\mu(\varepsilon - \eta)}\right] \quad (1-65)$$

Cette distribution est similaire à la loi normale et donne des résultats équivalents au modèle probit sous l'hypothèse d'indépendance des ε_{in} .

Le modèle logit multinomial s'exprime ainsi :

$$P_n(i) = \frac{e^{\mu V_{in}}}{\sum_{j \in C_n} e^{\mu V_{jn}}} \quad (1-66)$$

Le modèle logit multinomial présente de nombreux avantages concernant les manipulations mathématiques. Il est plus facile à paramétrer, appliquer et interpréter que le modèle multinomial probit (cf. 4222). Son inconvénient majeur est qu'il est restreint à des situations pour lesquelles les alternatives sont représentées par une fonction de choix indépendante par rapport aux choix extérieurs. C'est la propriété IIA (independence of irrelevant alternatives).

a. La propriété IIA

Cette propriété peut être facilement illustrée en observant dans l'équation de $P(i)$, que la probabilité relative qu'un individu n choisisse l'alternative i

$$P(i) = \frac{e^{U_i}}{\sum_j e^{U_j}}$$

plutôt que l'alternative j , ne dépend que des caractéristiques des alternatives i et j .

$$\frac{P_{in}}{P_{jn}} = \frac{e^{U_{in}}}{e^{U_{jn}}} \quad (1-67)$$

La probabilité relative de choix (entre i et j) est donc indépendante des autres alternatives disponibles : tant que les valeurs de U_{in} et U_{jn} ne changent pas, la probabilité relative ne changera pas, au regard des autres alternatives qui sont ajoutées ou supprimées de l'ensemble de choix.

La propriété IIA est à la fois la force et la faiblesse de la formulation logit (Certo, 1998). Elle est sa force dans le sens où le modèle peut être calibré sur un ensemble d'alternatives et utilisé pour prédire les choix pour un ensemble d'alternatives modifié. Par exemple, un modèle de choix de mode peut être calibré en se basant sur les modes disponibles et utilisé pour examiner l'impact d'un nouveau mode dans le système. Cette propriété peut aussi être exploitée dans le cas où l'ensemble des choix potentiels est très large (exemple : choix de localisation résidentielle) afin d'éliminer le besoin d'inclure des possibilités de choix dans les procédures de calcul. Cependant, cet avantage cache un inconvénient, car l'introduction d'une alternative nouvelle (c'est-à-dire d'un mode nouveau), entraînera une « rupture » importante, puisque l'on se base sur des fonctions d'utilité qui traduisent des « lois de comportement » à un instant donné. Celles-ci peuvent donc difficilement être utilisées pour prévoir des choix relativement à un mode qui n'existe pas, c'est-à-dire qui n'est pas intégré dans le comportement des individus. Elle est sa faiblesse car il faut veiller à ce que les alternatives prises en compte dans l'ensemble des choix soient bien indépendantes les unes des autres. Dès lors, si l'ensemble de choix laisse présager une violation de la propriété IIA, il sera plus prudent d'utiliser une formule de type probit ; qui est capable de manipuler des corrélations entre alternatives. Mais l'utilisation d'une formulation probit est délicate à mettre en oeuvre. On pourra, alors, modifier ce que l'on croit être la structure du processus de choix des individus, afin de réduire ou d'éliminer la dépendance entre les alternatives. L'utilisation d'une structure de choix « hiérarchique » a cette ambition.

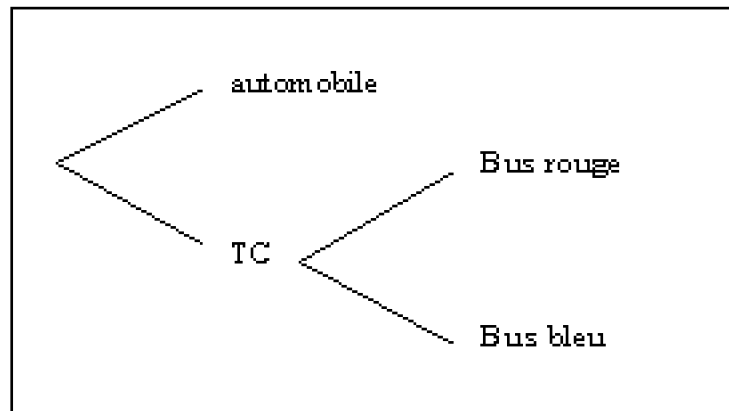
L'exemple type d'un ensemble de choix qui viole la propriété IIA est celui du bus rouge et du bus bleu (connu sous le nom de « *blue bus / red bus paradox* », adapté de Debreu, 1960). Soit des individus ayant le choix entre deux modes de transport pour se déplacer : l'automobile ou un service d'autobus rouge. Les coûts généralisés (ou la désutilité) des deux modes étant identiques, la répartition prévue par un modèle logit multinomial sera équivalente, 50% pour chacun. Si l'on peint en bleu la moitié de la flotte des bus (les autres attributs restant inchangés), les voyageurs ont désormais le choix entre trois modes de transport : l'automobile, le bus rouge, le bus bleu. On admet que les individus n'accordent aucune importance à la différence de couleur. Intuitivement, on s'attend à ce que les probabilités de choix respectives soient égales à $P(voiture) = 1/2$; $P(bus\ bleu) = P(bus\ rouge) = 1/4$. Le modèle logit multinomial, du fait de l'hypothèse IIA conduit à la répartition modale suivante : 33% pour la voiture, 33% pour le bus rouge et 33% pour le bus bleu. Ces probabilités de choix sont incohérentes étant donné que

même s'ils sont de couleurs différentes, les autobus ne représentent qu'un seul et même mode de transport. Il n'y a donc pas de raison pour que les parts de marché changent puisque les caractéristiques physiques du service bus (c'est-à-dire la vitesse, le coût, le confort, etc.) sont inchangés. En résumé, la propriété d'indépendance des alternatives non pertinentes est violée lorsque les alternatives (bus rouge / bus bleu) ne sont pas indépendantes l'une de l'autre, et la probabilité de choisir l'une est très corrélée à la probabilité de choisir l'autre. Dès lors, si l'ensemble de choix laisse présager une violation de la propriété IIA, il est plus prudent d'utiliser une formulation logit ayant une structure décisionnelle hiérarchique. En conclusion, bien que le modèle logit repose sur la théorie de la rationalité stochastique qui permet de prendre en compte les différences de goûts des individus, il est largement tributaire de la définition d'un individu « type » représentatif des goûts « moyens » de la population. En effet, la partie mesurable de la fonction d'utilité à partir de laquelle seront calculées les probabilités de choix est supposée identique pour tous les membres de l'échantillon. Autrement dit, le modèle logit suppose une grande homogénéité des comportements. Or cette hypothèse représente une simplification majeure par rapport à la réalité, car il est peu vraisemblable que tous les individus d'une population accordent le même poids (c'est-à-dire la même importance) aux attributs mesurables des différentes options de choix. Pour contourner cette limite, on propose souvent d'estimer plusieurs modèles, auxquels seront associés plusieurs vecteurs de paramètres, en découpant la population en sous-groupes homogènes.

b. La structure de choix hiérarchique

La principale limitation des modèles logit multinomiaux est que ces modèles restent confinés aux situations pour lesquelles la propriété d'indépendance par rapport aux choix extérieurs est satisfaite. Une approche pour résoudre la violation de la propriété IIA, proposée par Ben-Akiva (1973) consiste à modéliser le processus de choix selon une procédure emboîtée à deux (ou plusieurs) étapes. La détermination de la structure de choix à adopter dépendra de l'étude réalisée et des données disponibles. On différencie donc les options en spécifiant une série de sous-choix c'est-à-dire une structure décisionnelle hiérarchique. Les alternatives les plus semblables sont regroupées et constituent un niveau de la hiérarchie. Si l'on reprend l'exemple du choix de modes présenté ci-dessus entre l'automobile, le bus rouge et le bus bleu, on doit construire la structure suivante. Un premier choix doit être fait entre le mode automobile et le mode transport collectif (qui regroupe les deux types de bus), puis un second choix sera fait entre le bus rouge et le bus bleu si le mode transport collectif a été choisi précédemment.

La structure décisionnelle est de la forme :



Cela revient à calibrer deux modèles logit l'un caractérise le choix entre l'automobile et les transports collectifs, le second décrit le choix entre les deux options de transports collectifs.

Les modèles logit hiérarchiques (dits aussi logit emboîtés) permettent de modéliser le processus de décision de déplacement dans son ensemble et non plus un seul niveau de choix, tel que le choix du mode. En effet, dans un système de transport urbain, nous savons que les voyageurs sont susceptibles de se trouver devant un certain nombre de choix qui sont liés les uns aux autres. Les modèles logit hiérarchiques permettent d'établir une structure de modélisation récurrente et séquentielle. Ces modèles sont fondés sur des probabilités conditionnelles.

4222. Le modèle probit multinomial

Supposons que les ε_{in} et les ε_{jn} sont distribués selon une loi normale, avec une moyenne nulle, et de variances respectives S_i^2 et S_j^2 . Supposons que leur covariance est S_{ij}^2 (Certu, 1998). Sous ces hypothèses, le terme $\varepsilon_{jn} - \varepsilon_{in}$ est aussi normalement

distribué de moyenne nulle, mais avec une variance $S^2 = S_i^2 + S_j^2 - 2 S_{ij}^2$. On peut

utiliser ce résultat pour déduire les probabilités de choix par :

$$P_n(i) = P(\varepsilon_{jn} - \varepsilon_{in} \leq V_{in} - V_{jn}) \quad (1-68)$$

$$P_n(i) = \int_{-\infty}^{V_{in} - V_{jn}} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\varepsilon}{\sigma}\right)^2\right] d\varepsilon, \quad \sigma > 0 \quad (1-69)$$

d'où

$$P_n(i) = \Phi\left(\frac{V_{in} - V_{jn}}{\sigma}\right) \quad (1-70)$$

où Φ est la distribution normale de moyenne nulle et σ l'écart-type.

La formulation probit ne peut pas être facilement utilisée dans le cas multinomial, sauf sous certaines hypothèses simplificatrices. Ainsi, si l'expression précédente a un intérêt théorique évident, on constate que, dans la pratique, l'utilisation d'une formulation logit est préférée lorsque l'univers de choix est supérieur à deux.

43. La procédure d'estimation et les principes d'évaluation des modèles de choix discrets

431. La procédure d'estimation des modèles de choix discrets

La procédure d'estimation d'un modèle de choix discret se fait habituellement en utilisant la méthode du maximum de vraisemblance, introduite dans les années 1920 par Ronald Fisher. Elle consiste à définir à l'aide d'un échantillon d'individus et de probabilités données par le modèle, une « fonction de vraisemblance » notée $L(\theta)$ et à chercher la valeur des θ qui rend cette fonction maximum. Le plus souvent, on a comme information pour chaque échantillon d'individus :

- le choix effectué,
- les valeurs des caractéristiques des individus,
- les valeurs des caractéristiques des différentes alternatives.

Un modèle de choix discret est estimé sur un échantillon. Le maximum de vraisemblance correspond à la recherche de la valeur des paramètres qui permettent de mesurer la probabilité (que l'on doit maximiser) qui est la plus proche d'avoir généré l'échantillon observé (Certu, 1998).

Une hypothèse nécessaire pour pouvoir appliquer la méthode du maximum de vraisemblance est que l'échantillon sur lequel se fait le calcul est le résultat de tirages indépendants dans une population ayant une distribution multinomiale dont les probabilités sont données par le modèle logit. La fonction de vraisemblance exprime la probabilité d'obtenir l'échantillon de N observations indépendantes (X_1, \dots, X_N) étant donnée la distribution de probabilité $P(X_i, \theta)$ qui est le modèle dont on cherche le vecteur des paramètres θ à estimer ; cette fonction de vraisemblance peut se décomposer sous forme d'un produit grâce à l'hypothèse d'indépendance entre les x_i .

$$L(x_1, \dots, x_N, \theta) = \prod_{i=1}^N P(x_i; \theta) \quad (1-71)$$

L'approche consiste à considérer l'échantillon d'observation (X_N) comme donné et θ comme une variable dont on cherche la valeur qui maximise la vraisemblance de l'échantillon (X_N), c'est-à-dire la quantité L ; soit $\hat{\theta}$ la valeur cherchée de θ . $\hat{\theta}$ vérifie :

$$\frac{\partial \log L(\hat{\theta})}{\partial \theta} = 0 \quad (1-72)$$

où

$$\log L(\theta) = \sum_i^N \log P(x_i, \theta) \quad (1-73)$$

L'estimateur du maximum de vraisemblance (EMV) est la valeur de θ qui maximise le log de la vraisemblance :

$$\ell(\theta) = \sum \log p(X_i / \theta) \quad (1-74)$$

432. Des outils pour juger de la qualité des modèles de choix discrets

Ségonne (1998) distingue les tests formels et les tests informels.

4321. Les tests formels

1.

La plupart des logiciels qui permettent de calibrer des modèles logit fournissent des indicateurs pour estimer la précision de ces estimations. Le contrôle direct de la précision de l'estimation est réalisé grâce au calcul de l'écart-type de chaque paramètre estimé. Celui-ci est utilisé pour construire l'intervalle de confiance dans lequel la vraie valeur du coefficient doit se trouver (on utilise le fait que la distribution de la valeur estimée est approximativement normale dans le voisinage de l'optimum). En effet, il est particulièrement intéressant de savoir si la valeur nulle appartient à l'intervalle de confiance. Cela aide à déterminer si une variable doit être incluse dans le modèle. Si zéro n'appartient pas à l'intervalle de confiance, alors l'hypothèse que la vraie valeur du coefficient est nulle (c'est-à-dire que la variable peut être omise) peut être rejetée.

2.

L'écart-type permet également de construire les t-ratios (ou t de Student) : les t de Student permettent de décider de la crédibilité (pour un niveau de risque fixé variant en

général de 1 à 10%) de la variable testée, dans l'explication de l'utilité globale. Plus la valeur t est grande, plus grande est la contribution de la variable au modèle⁴. Les t -ratios sont associés à chaque coefficient. Ils sont calculés comme le rapport entre la valeur du coefficient et son écart-type, c'est-à-dire le nombre d'écart-type qu'il y a entre la meilleure valeur estimée et zéro. La qualité de l'estimation des paramètres croît quand le t -ratio croît. Ainsi, en théorie, une variable ne devrait être retenue seulement si son poids est statistiquement différent de zéro. Cependant, il peut arriver que le modélisateur conserve dans le modèle des variables « non significatives » si elles semblent intéressantes.

3.

Le troisième critère pour juger de la qualité du modèle sont les rapports de vraisemblance. Plusieurs cas se présentent selon la définition des hypothèses testées.

—

1er cas :

*

H_0 : tous les coefficients sont nuls,

*

H_1 : il y a au moins un coefficient non nul.

Le test est basé sur la statistique $-2[L(0)-L(\theta)]$ où $L(\theta)$ est la valeur de la fonction de la vraisemblance évaluée avec les coefficients estimés, et $L(0)$ est la valeur de la fonction de la vraisemblance avec tous les coefficients nuls. Cette statistique est distribuée asymptotiquement suivant une loi du χ^2 avec n degrés de liberté (n étant le nombre de coefficients estimés).

—

2ème cas :

*

H_0 : Tous les coefficients sont nuls, sauf les constantes spécifiques aux alternatives,

*

H_1 : Il y a au moins un coefficient différent des constantes qui soit non nul.

Le test est basé sur la statistique : $-2[L(c)-L(\theta)]$ où $L(\theta)$ est la valeur de la fonction de la vraisemblance du modèle estimé, et $L(c)$ est la valeur de la fonction de la vraisemblance du modèle composé uniquement des constantes spécifiques aux alternatives. Cette statistique est distribuée asymptotiquement suivant une loi du χ^2 avec $n-m+1$ degrés de liberté (n étant le nombre de coefficients, m étant le nombre d'options dans l'ensemble de choix possibles).

—

3ème cas : comparaison de modèles emboîtés

*

H_0 : modèle restreint

*

H_1 : modèle non restreint

⁴ Les niveaux de signification sont de 5%, à 10%.

Le test est basé sur la statistique : $-2[L(\theta_R) - L(\theta_{NR})]$ où $L(\theta_R)$ est la valeur de la fonction de la vraisemblance du modèle restreint, et $L(\theta_{NR})$ est la valeur de la fonction de la vraisemblance du modèle non restreint. Cette statistique est distribuée asymptotiquement suivant une loi du χ^2 avec $n-m$ degrés de liberté (n étant le nombre de coefficients du modèle non restreints, et m le nombre de coefficients du modèle restreint).

Pour ces trois types de tests, la règle de décision est la suivante : Si $-2[L(0) - L(\theta)] \geq \chi^2_n$ alors on rejette H_0 , on conserve le modèle non restreint, sinon on accepte H_0 . χ^2_n est la valeur critique lue dans la table χ^2 à n degrés de liberté, pour un niveau de risque α . Dans tous les cas, une forte valeur du test indique une amélioration significative de l'information reprise par le modèle.

4.

Un autre indicateur, le Rhô carré, permet de mesurer la qualité de reconstitution du modèle, c'est-à-dire la qualité de l'ajustement. C'est un indicateur du gain d'information apporté par un modèle par rapport à zéro ou aux constantes. Il est défini comme suit :

$$\rho^2 = 1 - \frac{L(\theta)}{L(0)} \quad \text{où } L(\theta) \text{ est la valeur de la fonction de la vraisemblance évaluée}$$

avec les coefficients estimés, et $L(0)$ est la valeur de la fonction de la vraisemblance évaluée avec tous les coefficients nuls. Si la valeur de la vraisemblance du modèle composé uniquement des constantes spécifiques aux alternatives est disponible, on peut utiliser l'expression suivante :

$$\rho^2 = 1 - \frac{L(\theta)}{L(c)} \quad \text{où } L(\theta) \text{ est la fonction de la}$$

vraisemblance du modèle estimé, et $L(c)$ est la fonction de la vraisemblance du modèle composé uniquement des constantes spécifiques aux alternatives.

Dans ce cas, le ρ^2 nous informe sur l'amélioration obtenue par rapport à un modèle ne contenant que les constantes. Dans tous les cas, la valeur du ρ^2 est comprise entre zéro et un, et meilleur est le modèle (c'est-à-dire plus $L(\theta)$ croît) plus ρ^2 est proche de 1. En pratique, une valeur de ρ^2 comprise entre 0,3 et 0,4 correspond à un ajustement de bonne qualité (Ségonne, 1998).

Pour les deux cas, un autre indicateur est également disponible, le Rhô carré redressé qui diffère du Rhô carré par une correction du nombre de coefficients estimés (n), il prend la forme suivante :

$$\overline{\rho^2} = 1 - \frac{L(\theta) - n}{L(0)}, \text{ pour le premier,}$$

$$\overline{\rho^2} = 1 - \frac{L(\theta) - n}{L(c)}, \text{ pour le second.}$$

Ce redressement permet de corriger le fait que la vraisemblance augmente automatiquement quand le nombre de variables explicatives dans le modèle croît. Cette statistique est voisine de la statistique R^2 des régressions linéaires.

Outre ces tests formels, un certain nombre de points peuvent être vérifiés de façon plus qualitative. Ce sont des tests informels qui reposent sur le « bon sens ».

4322. Les tests informels

L'essentiel de ces tests consiste à vérifier la valeur des coefficients estimés :

1.
Premièrement, on vérifie la cohérence des signes de certains coefficients par rapport à ce que préconise la théorie. Par exemple, une variable de coût doit être valorisée par un coefficient de signe négatif, tout comme le temps de parcours puisque l'attractivité d'un mode ou d'un itinéraire augmente quand ses coûts monétaires et temporels diminuent.
2.
Deuxièmement, on examine les valeurs relatives des paramètres du modèle, ils doivent être raisonnables les uns par rapport aux autres. Lorsqu'un modèle ne satisfait pas à ces tests, c'est en général le fait d'une erreur de spécification.
3.
Troisièmement, on teste la valeur absolue des coefficients, en examinant les élasticités (directes ou croisées) impliquées par le modèle. On compare les résultats obtenus à ceux d'études antérieures, afin de juger de leur cohérence ainsi que de l'ordre de grandeur. L'élasticité de la demande représente la relation entre la variation relative de la demande et la variation relative d'une variable explicative de cette demande. La demande de déplacement pour un mode ou un itinéraire particulier est affectée aussi bien par des modifications des paramètres caractérisant les modes ou itinéraires concurrents. Ainsi, pour un individu n , l'élasticité directe de la demande de l'éventualité i par rapport à une caractéristique X_{ik} est mesurée pour un déplacement effectué selon cette même éventualité, tandis que l'élasticité croisée de la demande de l'éventualité j est calculée par rapport à une caractéristique X_{ik} mesurée pour un déplacement effectué selon l'éventualité i .
4.
Quatrièmement, un autre type de test consiste à analyser la propension du modèle à reproduire les comportements observés à l'instant t . Cela consiste à calculer, par exemple, les parts de marché prévues par le modèle, et de les comparer à celles observées. Pour ce faire, on construit un tableau croisant les choix observés (en lignes) et ceux prédits (en colonnes) par le modèle en vue de calculer la proportion de prévisions correctes au temps t .

44. Les limites des modèles de choix discrets

Les modèles de choix discrets sont soumis à un certain nombre de limites (Ceturius, 1998).

441. Les limites liées aux données

La qualité des modèles de choix discrets est très étroitement liée aux données nécessaires à leur fonctionnement. Les problèmes de récolte de données peuvent être conséquents, d'autant plus que, dans certains cas, ces données n'existent même pas. Ainsi, il est souvent nécessaire de les produire (à l'aide d'enquêtes spécifiques) et/ou de faire appel à des outils informatiques performants ; ce type d'outils permet, par exemple, de redresser des matrices de temps existantes, ou de calculer des temps d'accès au réseau de transport collectif.

442. Les limites liées aux problèmes de stabilité des comportements

Parce que ces modèles traduisent des « lois de comportements », ils sont sensibles aux variations concernant les variables explicatives qui les caractérisent. Il est donc délicat de les utiliser sur le long terme, et d'effectuer des tests qui entraînent une « rupture » trop importante. Par exemple, le test d'une offre de transport collectif nouvelle qui n'existe pas dans l'agglomération. On testera ce genre de mesure sur le court ou moyen terme en faisant varier les variables de base concernant l'offre de transport collectif pour les liaisons concernées.

443. Les limites économétriques

Ces limites concernent le fait que l'on raisonne toujours « toutes choses égales par ailleurs ». Le fait qu'un certain nombre de variables explicatives soient présentes au sein de ces modèles ne fait pas sortir de ce type de raisonnement. Ainsi, on réfléchira toujours de la même manière, même si le nombre de variables est conséquent, certaines variables n'ayant de toute façon pas été intégrées dans la modélisation.

444. Les limites de procédure de calage

D'un point de vue pratique, on ne peut jamais dire que les résultats issus de la procédure de calage du modèle sont les meilleurs et ceci quelle que soit la procédure de calage. Ainsi, si l'on considère la notion de formulation d'un modèle, telle que :

$$M = F(\theta, X)$$

Avec

·
 M = modèle

·
 F = mécanisme causal

θ = paramètres

X = entrées.

Dans le cas d'un modèle désagrégé, les paramètres θ sont calés à partir d'un échantillon de n individus dont nous connaissons les caractéristiques X ainsi que le choix. La procédure de calage consiste à résoudre un problème d'optimisation :

$$\text{Minimiser } (Obs - F(\theta))^2$$

où Obs représente l'observation et $F(\theta)$ la prévision du modèle pour les paramètres θ .

Ceci peut correspondre à un calage à partir du principe des moindres carrés (l'écart entre l'observé et le prédit est minimisé) ou à partir du maximum de vraisemblance. La procédure de calage se résolvant par une méthode d'optimisation, un problème intervient. En effet, rien ne permet d'affirmer que son résultat est le meilleur (on obtient un optimum local et non un optimum global).

Conclusion du chapitre 1

Les raffinements théoriques qui ont fait l'objet des sections précédentes contrastent avec les imperfections des données utilisées pour leur mise en oeuvre. La construction des modèles de déplacement vise à produire des évaluations des déplacements à des horizons temporels donnés pour les besoins de la planification. Ces modèles visent l'opérationalité. Aussi, le choix des modèles est bien souvent dicté par la disponibilité des données et par le coût de leur obtention plus que par l'adéquation théorique au problème posé. L'exercice de modélisation est associé à une problématique d'arbitrage entre force théorique du modèle et représentation de l'objet étudié sous contraintes de données. Cet arbitrage est en quelque sorte celui entre qualité théorique du modèle et qualité économétrique des variables explicatives.

L'objectif de notre travail est la construction d'un modèle de déplacements urbains particulier. Nous allons donc être confronté à l'arbitrage entre qualité théorique et qualité économétrique. Aussi, dans un premier temps, nous nous sommes efforcés d'examiner toutes les pistes théoriques pertinentes susceptibles de répondre aux objectifs de notre modèle. L'approche des choix discrets et en particulier le modèle logit multinomial paraît constituer une piste séduisante. Néanmoins, nous verrons en deuxième partie que cette approche n'est pas toujours adoptable étant donné la qualité des données dont nous disposons. Les deux chapitres suivants donnent également des pistes théoriques pour notre modèle, notamment concernant la modélisation des effets interactifs entre le système de transport et le système d'occupation des sols.

Chapitre 2. Le lien transport-urbanisation : une revue

des approches théoriques

Introduction

Pour introduire ce chapitre, un examen de la relation transport-urbanisation dans l'histoire du développement urbain sera proposé. Par la suite, une approche conceptuelle du système urbain sera exposée. Elle permettra de dégager les différents types d'interactions à l'oeuvre dans ce système. Enfin, la notion de causalité sera discutée dans son sens général, ce qui nous amènera à réfléchir sur le type de causalité à l'oeuvre entre transport et urbanisation.

1. L'existence d'interactions entre transport et urbanisation

La planification urbaine et la planification des transports ont coexisté longtemps comme deux disciplines séparées, subissant le contrôle d'organismes différents. Cette dichotomie revient à nier le fait que l'évolution des formes urbaines est conditionnée par l'existence d'interactions complexes entre structure des localisations et transport.

Cela apparaît clairement dans l'histoire des villes : les établissements de commerce se sont développés dans les endroits qui présentaient des avantages en termes de transport des marchandises et une bonne accessibilité aux ressources. Ainsi, ils se sont généralisés au bord des rivières ou des côtes, pouvant bénéficier de transport par eau. Comme les établissements se développaient et que de nouvelles sources de matières premières étaient découvertes, une meilleure connexion en transport entre ces différents endroits était nécessaire. Cela a encouragé le développement des canaux, des chemins de fer, des routes aménagées, et en retour a renforcé le développement de grandes villes dans les endroits pourvus de bonnes conditions de transport. Par la suite, les transports mécanisés ont eu un profond effet, non seulement sur la localisation des villes, mais également sur leurs structures. Initialement, la taille des villes était réduite de façon à ce que les habitants puissent aller d'un endroit à un autre en marche à pied. Les plus grandes villes étaient donc très denses. L'introduction dans un premier temps des transports mécanisés a autorisé une certaine dédensification, et a permis aux habitants à se disperser le long de la voie, où ils pouvaient vivre dans des lieux moins denses, tout en bénéficiant d'une bonne accessibilité au centre. Le développement de l'usage de la voiture particulière a renforcé fortement ce phénomène.

Bauer et Roux (1976) mettent en évidence cinq phases de mutations morphologiques des villes liées à l'introduction de nouveaux moyens de transport (figure 2-1). La première phase se situe jusqu'au milieu du XIX^{ème} siècle. Les villages sont situés au carrefour des pistes les plus importantes. Les activités commerciales et artisanales s'y développent beaucoup plus qu'ailleurs. L'extension des villages se fait par simple agglutination. La taille de ces agglomération est soumise à une limite dérivant du temps maximal pour aller à pied d'une de ses extrémités à l'autre. Plus la ville approche cette limite, plus on se met

à densifier sur place en resserrant les bâtiments et en construisant en hauteur. L'agglomération n'est pas beaucoup polarisée en son centre puisqu'aucun établissement, quelle que soit l'intensité des relations qu'il entretient avec d'autres, n'a d'intérêt vraiment marqué à se trouver juste à cet endroit. Le coefficient d'occupation du sol est assez étalé sur l'ensemble de la ville, sans différence forte entre le coeur et la frange. La deuxième phase débute à partir de 1850. Le type de croissance précédent se poursuit, mais plus par densification que par agglutination. Mais avec le développement du chemin de fer, la majeure partie des constructions est attirée hors de la ville autour des gares des localités voisines. C'est l'essaimage. Dès lors, le zonage et la centralisation, phénomènes clés de l'urbanisation moderne, sont inscrits dans les faits. En effet, entre l'agglomération mère et les satellites, l'écart de qualité de desserte devient tel qu'un individu ou un organisme qui a des relations nombreuses et fréquentes avec d'autres est prêt à payer très cher la possibilité de s'installer dans le centre, au noeud des communications. De là, le début des banlieues. La troisième phase commence à partir de 1900. Un troisième type d'extension vient s'ajouter aux deux précédents. De nombreux moyens de transport public à moteur sont mis en place sur les axes routiers et convergent vers la ville. Ils provoquent une urbanisation continue en doigts de gant, et non plus discontinue en grappe. Les stations étant plus proches les unes des autres que ne le sont les gares de chemins de fer. Enfin, les phases quatre et cinq : à partir de 1950 en France. La généralisation des véhicules rapides individuels est à l'origine d'une troisième transformation importante du processus de croissance urbaine. En fait, l'automobile et les deux roues ont deux effets simultanés mais distincts. D'une part, ils font reculer les limites imposées jusqu'ici à l'agglomération dans ses parties éloignées des transports publics, rendant ainsi vigueur au processus ancien mais presque éteint de l'agglutination. Le noyau grossit, les doigts de gant s'allongent et s'épaississent (phase 4). D'autre part, ces modes de transport font entrer dans le champ des relations faciles de proximité l'ensemble des villages périphériques jusqu'ici hors d'atteinte parce qu'ils n'étaient pas desservis par les transports publics. Toutes les localités de la région croissent. L'interpénétration de l'espace agricole et de l'espace urbanisé devient une donnée permanente du cadre de vie (phase 5).

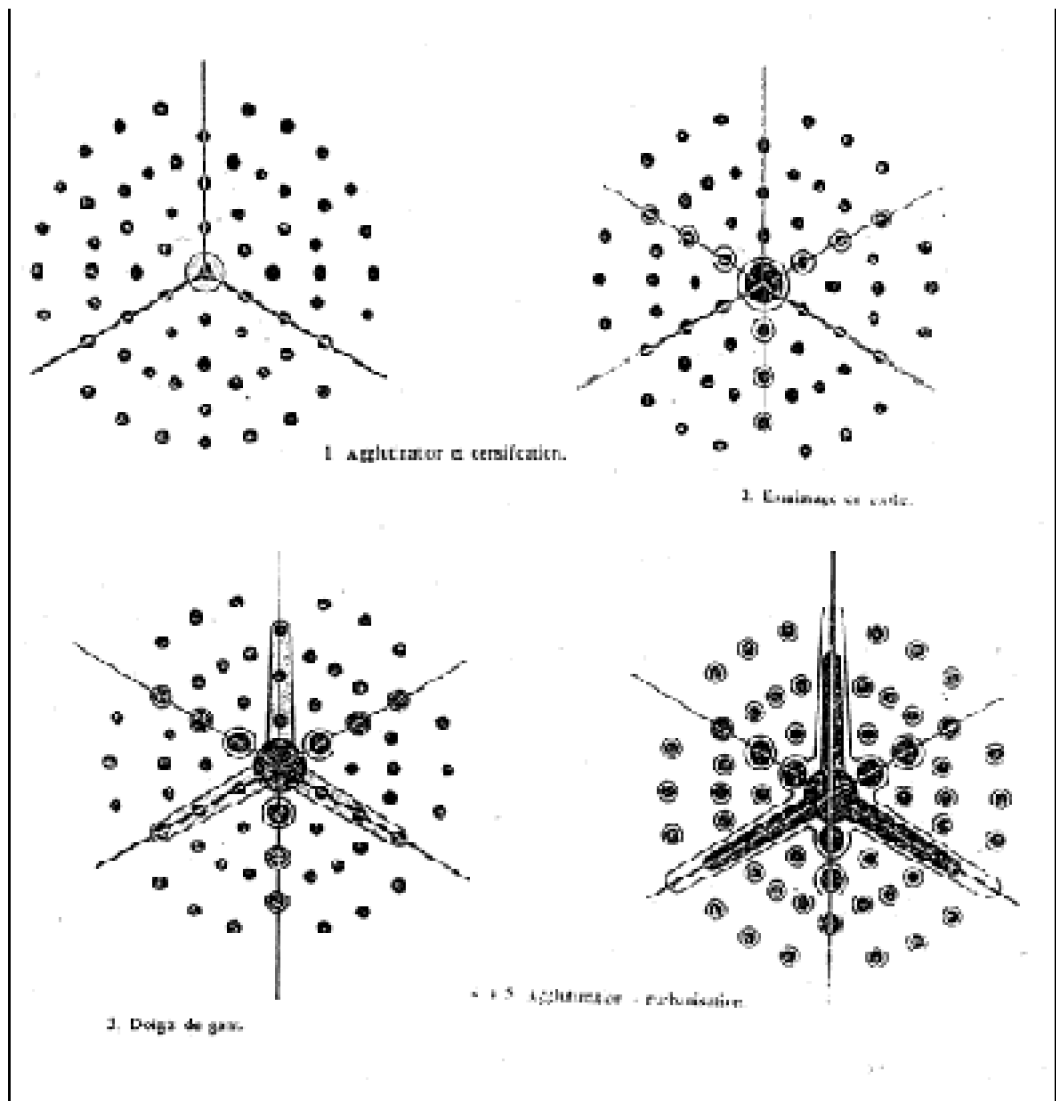


Figure 2-. Modes de transport et organisation de l'espace

Source : Bauer, Roux, *La ruralisation ou la ville éparpillée*, Paris : Le Seuil, 1976.

Nous avons déjà souligné que pour mieux comprendre l'interaction entre le transport et les formes urbaines, il convient de revenir sur la définition ou la conception de la ville. « Il est nécessaire pour comprendre la ville, de se doter d'une certaine conception de l'espace urbain : cela revient à désigner à travers la multitude désordonnée des apparences, les éléments auxquels on reconnaît un caractère essentiel et dont les relations bien comprises peuvent constituer un système d'explication des transformations de la cité » (Bonnaïfous, Puel, 1983). La conception de l'espace urbain (que nous avons rapidement présentée dans le chapitre précédent) que propose Bonnaïfous et Puel rejoint celle de Manheim (1979). Elle repose sur l'hypothèse selon laquelle la ville peut être interprétée comme l'imbrication de trois sous-systèmes, dotés chacun d'une logique de fonctionnement et de transformation mais qui s'articulent les uns avec les autres selon des relations complexes de causalité. Les trois sous-systèmes sont les suivants :

un système de localisation : il désigne principalement l'utilisation du sol, que ce soit aux fins d'un usage direct (voirie, espaces verts, etc.) ou comme support d'immeubles érigés dans la troisième dimension de l'espace.

un système de déplacements : celui-ci est constitué tout à la fois des flux de biens et de personnes qui parcourent la ville et de ce qu'il est convenu d'appeler le système de transport, qui en constitue le support.

un système de pratiques et relations sociales : les activités de la vie quotidienne s'inscrivent dans un mode de fonctionnement de la société. Le travail, les activités ménagères, les achats, les loisirs, etc. se déroulent dans le cadre d'une certaine organisation sociale de la production, de la consommation ou des services collectifs. Le système de pratiques et de relations sociales, qui fait de la ville autre chose qu'un espace minéral inscrit sur le sol, désigne donc le déroulement des activités de citoyens, scandé par l'organisation de la société urbaine.

Cette systémique à trois dimensions soumet l'interprétation appartenant *a priori* à l'un des trois sous-systèmes à l'analyse des logiques d'interactions que celui-ci entretient avec les deux autres. Les logiques d'interactions entre les trois sous-systèmes permettent de comprendre les transformations de l'espace urbain.

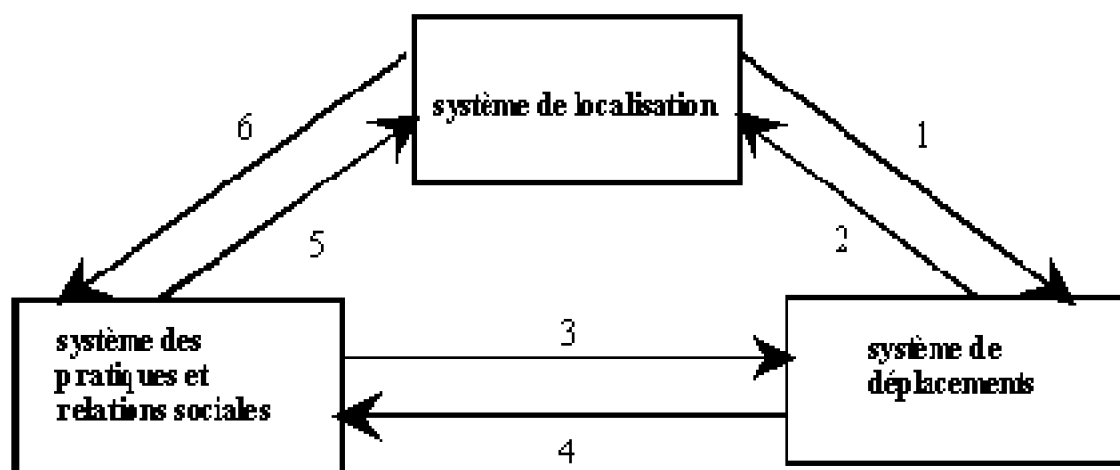


Figure 2-. Une conception du système urbain

La relation 1 : le rôle du système des localisations sur le système de transport. Le système des localisations conditionne la formation des déplacements dans la mesure où la demande de déplacements est une demande intermédiaire. Les individus se déplacent dans le but de réaliser une activité, qu'elle soit économique ou de l'ordre des affaires privées. La mobilité quotidienne est avant tout le résultat de l'inscription dans l'espace et dans le temps de programme d'activités d'individus.

La relation 2 : le rôle du système de transport sur le système de localisation. Le

système de transport intervient sur le système des localisations, par le biais, d'une part du développement des infrastructures, et d'autre part et corrélativement par l'introduction ou le renforcement de nouveaux modes de transport. L'amélioration des systèmes de transport peut potentiellement avoir un impact sur les schémas d'activités par l'intermédiaire des changements dans les niveaux d'accessibilité des diverses localisations et activités. Cependant, l'impact du système de transport sur les schémas d'activités est complexe et contingenté à un ensemble d'autres facteurs. Le rôle des transports sur la localisation des activités et des ménages a été souligné par de nombreux auteurs. La théorie classique (Perreur, 1988) donne au transport un rôle essentiel dans le choix de localisation de l'entreprise : celle-ci se place à l'endroit qui minimise son coût total de transport (acheminement des intrants et expédition des produits). Ce principe conduit à une localisation unique, indépendante du niveau de production, et il aboutit à une maximisation de profit de l'entreprise, mais sous réserve d'hypothèses restrictives : constance des rendements et des coefficients de production, absence d'externalités, niveau et localisation de la demande prédéterminés. En ce qui concerne les ménages, le transport joue également un rôle prépondérant dans les théories de l'économie urbaine.

La relation 3 : le rôle du système des pratiques sociales sur le système de transport. Le système des pratiques et des relations sociales intervient à deux niveaux sur le système de transport : d'une part, sur le niveau de la mobilité globale, d'autre part, sur le partage modal. Des études ont montré le rôle de l'élévation des revenus et de la motorisation sur l'augmentation de la mobilité. Par ailleurs, les modes de vie périurbains ont une influence sur le partage modal, dans la mesure où l'usage de la voiture particulière est quasi indispensable dans les espaces périurbains.

La relation 4 : le rôle du système des transports sur les pratiques sociales. Les transports ont certainement des effets sur les pratiques sociales. Par exemple, l'accroissement de la facilité de transport permet d'augmenter la fréquence des échanges humains et autorise l'élargissement des aires de sociabilité.

La relation 5 : l'impact du système des pratiques sociales sur le système des localisations. L'évolution des pratiques sociales, comme par exemple l'usage accru de la voiture particulière, peut favoriser certaines formes urbaines, comme la périurbanisation.

La relation 6 : l'impact du système de localisation sur le système des pratiques sociales. En retour, certaines formes urbaines contribuent et renforcent l'exercice de certaines pratiques sociales. Par exemple, les espaces périurbains rendent nécessaires l'usage de la voiture particulière.

Ainsi, les interactions qui constituent la dynamique urbaine sont nombreuses et complexes. Dans le cadre de notre thèse, nous nous intéressons uniquement à l'interaction entre le système de transport et le système des localisations urbaines. Dans le paragraphe suivant, nous allons tenter d'analyser quel type de causalité nous pouvons établir entre ces deux systèmes.

2. La recherche d'une causalité

Nous supposons que la relation entre système de déplacement et système de localisation est double. Les changements que connaissent les villes ont d'importantes incidences sur

les déplacements et l'offre de transport, lesquels affectent à leur tour la façon dont les villes évoluent. La première relation ne pose plus de problème et a été détaillée dans le chapitre précédent. Pour résumer, nous rappelons que la demande de déplacements est une demande dérivée, elle découle des besoins de réalisation d'activités. La deuxième relation paraît moins immédiate. Il faut alors rechercher le type de causalité mis en oeuvre. L'objectif est de connaître l'influence du système de transport sur la structure urbaine. Plassard (1975) s'est interrogé sur la notion de causalité au sujet du problème des effets structurants des autoroutes sur le développement régional. Nous nous démarquons de cette problématique dans la mesure où notre objectif n'est pas d'analyser ou de mesurer les effets du système de transport sur le développement économique urbain mais d'étudier l'effet des modifications du système de transport sur les configurations urbaines, ou plus précisément l'effet des changements des conditions de transport sur les choix de localisation des ménages et des activités. L'analyse des types de causalité énoncée par Plassard nous est cependant utile pour mieux déchiffrer le phénomène. La plupart des auteurs mettent des significations extrêmement diverses sous ce terme, confondant parfois la simple concordance statistique avec la causalité. Il est donc nécessaire de voir quels sont les divers types de causalité et comment les diverses approches statistiques permettent non pas de les établir, mais au mieux de les postuler. C'est le rôle de la théorie de poser la relation de causalité. Dans un contexte scientifique, la causalité ne peut être que la recherche d'un certain ordre dans les faits empiriques, d'une relation privilégiée entre deux événements. Bonnaïfous (1989) retient deux types de causalité, la causalité « prédictive » et la causalité de « type G.S.R (Generalized stimulus reponse) » : la seconde est une relation fondée sur la répétition d'un événement B lorsqu'un événement A survient. Dans le premier cas, connaissant A on peut prévoir B, alors que dans le second cas, non seulement on peut prévoir B, mais on sait en plus qu'il existe un lien de dépendance stricte entre A et B. L'exemple que prend Plassard permet de mieux situer les deux types de causalité. Soit trois événements A, B, C dont on sait *a priori* que A cause B et que B cause C. Entre A et B et entre B et C, il y a une causalité de type G.S.R.. Par contre, entre A et C, nous pouvons établir une relation prédictive. En effet, chaque fois que A se produira, B s'ensuivra et donc C. En revanche, si la structure A, B, C est telle que A soit (au sens de causalité G.S.R.) la cause unique de B et C, on peut toujours établir une relation de causalité entre B et C ou entre C et B, puisque chaque fois que B se produira C se produira aussi. Nous retrouvons là un problème bien connu des économistes et des statisticiens : comment passer de la constatation d'une simple concordance à l'établissement d'une relation causale. Pour Plassard, le seul type de causalité qui mérite cette désignation est de type G.S.R.. La connaissance parfaite des divers liens de causalité entraîne nécessairement la possibilité de prévoir. Cette structure de cause à effet, qui est une des recherches constante de l'activité humaine, ne peut être observée. C'est l'observation de relations particulières entre deux événements A et B qui conduit l'observateur à leur appliquer une structure de causalité. Une telle relation postulée, ne peut d'autre part, être que relative : elle dépend du niveau auquel se situe la connaissance. Supposons en effet trois événements se causant mutuellement : $A \rightarrow B \rightarrow C$. Si l'événement B ne peut être perçu, on en conclut tout naturellement que C est causé par A, ce qui se révélera faux dès que B sera connu. Plassard (1975) souligne que le recours à la théorie est bien souvent indispensable pour rendre univoque une relation

entre deux variables. C'est d'ailleurs la seule possibilité pour établir une relation de causalité. « Loin d'être une infirmité, ce recours à la théorie est en fait la seule voie pour une tentative d'explication » (Plassard, 1975). En effet, tout établissement d'une relation entre deux phénomènes est le résultat d'une double opération d'abstraction. Tout d'abord, ce ne sont pas des faits bruts, ou prétendus bruts tels que l'observateur prend en considération, mais des phénomènes qu'il crée par les conditions mêmes de l'expérience. Ensuite, il appliquera sur les relations qu'il pourra mettre en évidence entre ces deux phénomènes des structures logiques, telle que la relation de causalité. On ne peut donc pas dire que celle-ci existe dans les phénomènes observables. Vouloir rechercher une relation de causalité, c'est donc toujours théoriser dans la mesure où l'on tente d'expliquer par une certaine structure les caractéristiques de phénomènes créés partiellement par l'observateur. L'usage de la théorie est indispensable à condition qu'il soit explicite. De nombreuses contributions théoriques peuvent alimenter l'étude du rôle du transport sur les choix de localisation, et donc l'analyse de l'interaction. C'est ce que nous allons présenter dans le présent chapitre. Ces contributions sont de divers ordres. Certaines postulent une causalité quasi mécanique : ce sont les modèles de type gravitaire. D'autres proposent une explication plus économique, fondée sur le comportement rationnel des agents économiques. Pour les auteurs de l'économie urbaine, l'analyse du rôle des transports dans la ville passe par le mécanisme de la rente foncière. De nombreuses critiques peuvent être adressées à ces modèles, notamment concernant l'extrême simplification de la représentation de la ville qu'ils posent. Cependant, ces modèles présentent un grand intérêt normatif. Il s'agit de constructions théoriques qui aident à la compréhension et à l'explication des phénomènes observés.

Dans un premier temps, nous présenterons deux notions essentielles : celle de l'interaction spatiale (section 1) puis celle de l'accessibilité (section 2). La notion d'interaction spatiale a donné lieu à de nombreux développements, notamment les modèles gravitaires. La notion d'accessibilité peut être considérée comme une notion centrale dans la relation transport-urbanisation. Dans un second temps, nous présenterons les grandes traditions en termes de modélisation du système urbain et insisterons sur la façon dont est envisagée l'action du transport sur l'urbanisation. Ainsi, les principaux modèles de simulation des localisations urbaines seront exposés (section 3). Puis, les principaux enseignements des modèles de la micro-économie urbaine concernant le rôle du transport sur les choix de localisation seront rappelés (section 4). La section 5 présentera une approche alternative à ces derniers modèles, à savoir les modèles de choix discrets de localisation fondés sur la théorie de l'utilité aléatoire.

Section 1. La notion d'interaction spatiale et les modèles gravitaires

11. Le concept d'interaction spatiale

En analyse spatiale, l'interaction est un concept fondamental, qui exprime le lien, l'échange, la dépendance et parfois même la causalité. De l'interaction naît l'échange, se forme la substance même de l'économie régionale, toutes les théories de la croissance et du développement y font nécessairement référence (Vermont-Desroches, 1994). D'un

point de vue systémique - point de vue auquel se réfère souvent l'analyse spatiale - l'interaction correspond à la dynamique du système, elle est son moteur, elle en justifie son existence même. « Il serait probablement possible de redessiner l'histoire de la pensée économique spatiale autour de ce concept privilégié. En effet, le rôle des transports, si déterminant dans l'analyse de la localisation optimale (de Thunen à nos jours) ou dans l'analyse du développement spatial (théorie de la base) est corrélatif à celui de l'interaction. Les transports ne sont, dans cette perspective, qu'une matérialisation de cette interaction » (Vermont-Desroches, 1994).

L'interaction spatiale est un phénomène fondamentalement socio-économique. Le développement, la maximisation d'une interaction ont été, d'un point de vue historique, à la fois des gages de sécurité et d'efficacité économique. La naissance et la croissance des villes sont une manifestation évidente de l'interaction humaine dans l'espace économique. L'interaction spatiale se définit plus précisément à partir des phénomènes qu'elle engendre directement. Ces phénomènes d'interaction spatiale concernent naturellement l'échange, les déplacements de personnes et de marchandises mais également toutes les relations de proximité qui favorisent le développement des espaces économiques.

Toutes les activités localisées dans l'espace physique (unités de production, unités démographiques ou villes) entretiennent avec le milieu environnant un réseau de rapports complexes. Il semblerait que ces rapports s'organisent sur la base de champs gravitationnels, sensibles à la dimension des activités localisées sur le territoire et à leur distance relative. Chaque point de l'espace paraît en effet subir (et exercer) une influence qui dépend proportionnellement de l'intensité des masses en jeu, et en proportion inverse, de la distance qui les sépare de tout autre point de l'espace (Camagni, 1996). Le modèle qui traduit le principe d'interaction spatiale en termes analytique et opérationnel est le modèle « gravitationnel », ainsi nommé par analogie avec le modèle newtonien de la gravitation universelle.

12. Les modèles d'interaction spatiale : les concepts de base

Il existe une littérature abondante sur les modèles d'interaction spatiale. Les premiers travaux dans ce domaine renvoient aux contributions de Reilly (1931), Hoytt (1939), Stewart (1948), Zipf (1949), Converse (1949), Clark (1951), Isard (1956), Hansen (1959). Dès son apparition au milieu du XIX^{ème} siècle, l'étude scientifique des interactions humaines se place sous le giron des sciences physiques. On ne parlait pas encore de sociologie mais de physique sociale. Raveinstein n'hésitait pas à assimiler le comportement des individus au comportement des atomes. Il n'y avait donc qu'un pas à franchir pour proposer une formalisation mécaniste à la Newton du phénomène d'interaction spatiale.

Dans les modèles d'interaction spatiale, les sols occupés par des activités sont définis comme des unités d'espaces agrégés ou des zones, contenant un certain nombre d'activités. Ces agrégats interagissent, générant des flux de nature diverse, qui peuvent être des flux concrets comme les déplacements, les migrations, les transports de marchandises, etc., ou plus abstraits comme des dépendances, des diffusions, des

opportunités d'attributs. Les zones sont reliées aux autres par des infrastructures importantes ou par un réseau, dépendant de la nature des flux observés.

La forme gravitaire des modèles d'interaction spatiale établit l'interaction entre deux zones en proportion avec le nombre d'activités dans chaque zone (masses) et en proportion inverse à la friction imposée par une infrastructure particulière qui les connecte entre elles.

La formulation est un modèle de gravité qui, dans sa formulation générale s'écrit :

$$T_{ij} = k_{ij} \frac{M_i}{M_j} f(B, d_{ij}) \quad (2-1)$$

T_{ij} est la variable d'interaction qui exprime en unité physique ou monétaire le lien de dépendance spatiale entre un sous-espace i appelé zone d'origine et un sous-espace j appelé zone de destination.

k_{ij} est un facteur de proportionnalité permettant la cohérence du système d'unité choisi.

M_i représente le poids économique de la zone i , il peut s'agir d'une population, d'une quantité de marchandises, d'une surface, d'un revenu global, bref, de tout ce qui peut constituer un facteur émetteur, générateur d'interaction.

M_j représente le poids économique de la zone de destination j : il s'agit d'un facteur d'attraction lui aussi générateur d'interaction.

f est une fonction quelconque positive.

B est un ensemble de paramètres.

d_{ij} une distance géographique ou économique séparant les deux sous-espaces i et j .

Cette formalisation générale est toujours en vigueur : elle expose clairement les deux dimensions que comporte tout phénomène d'interaction spatiale : la dimension de « potentiel » qui se retrouve dans les deux poids M_i et M_j générateurs de l'interaction ; la dimension de « flux » exprimée à travers la variable T_{ij} et qui concerne la réalisation de cette interaction.

Le modèle gravitationnel et ses dérivés permettent d'exprimer de façon synthétique le principe d'interaction spatiale, et de lui donner une mesure empirique, sur la base d'une analogie avec la physique des corps. Bien que le système fonctionne convenablement dans les applications statistiques et économétriques, sa déduction par analogie d'une théorie conçue dans une autre discipline pour expliquer des phénomènes territoriaux a été longtemps considérée comme une faiblesse intrinsèque. La réflexion théorique consacrée aux fondements des modèles de gravitation s'est développée relativement

tard. Fustier (1988) distingue deux contributions essentielles selon qu'elles se réfèrent à une macro-analyse des comportements ou qu'elles proposent de dériver un modèle de gravitation à partir d'une analyse du comportement spatial menée au niveau individuel. La contribution majeure dans le domaine de la macro-analyse du comportement spatial est celle de Wilson (1970) avec le concept d'entropie emprunté à la thermodynamique.

13. L'analogie thermodynamique et le principe d'entropie

L'approche des phénomènes d'interaction spatiale basée sur le principe de l'entropie maximale a été proposée par Wilson à la fin des années soixante. Cette proposition permet de poser la spécification de ces modèles en des termes mathématiquement plus cohérents, et de leur donner une base théorique plus solide.

13.1. le concept d'entropie : une macro-analyse du comportement spatial

Née d'une intégrale, l'entropie est utilisée en thermodynamique pour mesurer le degré du désordre atteint par un système gazeux, mais également appliquée par les théoriciens de l'information. En thermodynamique, le principe d'entropie gouverne la dynamique de dégradation de l'énergie dans la physique des processus irréversibles loin de l'équilibre. Il décrit le parcours d'un système soumis à une excitation externe (variation de pression par exemple) qui va de l'« ordre » au « désordre » moléculaire, c'est-à-dire d'une situation de faible probabilité à une situation de forte probabilité. On peut appliquer ce principe à l'analyse des systèmes formés d'un grand nombre d'éléments où il importe moins de connaître l'état de chaque élément particulier que le nombre d'éléments qui se trouvent dans un état particulier donné, sans tenir compte de leur individualité. Le principe d'entropie permet en effet, dans une situation d'information imparfaite, de déterminer la condition tendancielle la plus probable du système qui correspond à sa condition d'équilibre (ou d'entropie maximale).

Wilson part de la formulation d'un système spatial⁵. Celui-ci est représenté par une matrice $n \times m$ de déplacements (ou interactions) T_{ij} entre une série de zones d'origine i , ($i \in I, i=1..n$) et de zones de destination j ($j \in J, j=1..m$). Il s'agit du cadre spatial servant de référence à l'observation générale des flux. Supposons que l'on s'intéresse aux déplacements des résidents de I vers les lieux de J pour un motif donné, le travail. T_{ij} sont alors les déplacements domicile-travail de la population N du système, localisée en termes résidentiels en zones d'origine et en termes d'emplois en zones de destination (on suppose pour simplifier que chaque résident est un travailleur). Le tableau de contingence suivant représente une distribution du système à un moment donné.

⁵ Nous reprenons ici la présentation faite par Bernard Fustier dans le chapitre 5 de l'ouvrage dirigé par Claude Ponsard. *Analyse économique spatiale*, P.U.F., 1988, Paris.

I \ J	1	j	m	Σ
1				
..				
i		t_{ij}		$t_{i.}$
n				
Σ		$t_{.j}$		T

Figure 2-. Tableau de contingence représentant une distribution du système spatial à un moment donné

t_{ij} : nombre de personnes de la zone i effectuant un déplacement en j ,

$t_{i.}$: nombre de résidents de la zone i ,

$t_{.j}$: nombre de personne qui se sont déplacés en j ,

T : population étudiée.

L'information de base est limitée au macro-état du système, c'est-à-dire au nombre de résidents dans chacune des zones origine O_i et au nombre d'emplois dans chaque zone de destination D_j ; tandis que le micro-état du système, c'est-à-dire la localisation de l'emploi et de la résidence de chaque individu, est inconnu, mais en réalité peu important. L'inconnue importante est le nombre d'habitants de chaque zone i qui se rend tous les jours au travail en zone j , ce que l'on peut appeler le méso-état T_{ij} du système. La description du système spatial est quantitative et ne permet pas d'individualiser les unités statistiques qui demeurent interchangeables. Par conséquent, le nombre de fois où l'on peut obtenir cette distribution dépend des permutations pouvant être réalisées à l'intérieur des cases du tableau :

$$P = \frac{T!}{\prod_{i,j} t_{ij}!} \quad \text{avec } T = \sum_i \sum_j t_{ij} \quad (2-2)$$

Ainsi, la distribution la plus fréquente correspond à la plus grande valeur de la

fonction W . Au lieu de travailler sur cette expression complexe, Wilson considère son logarithme et introduit l'entropie du système :

$$\ln W = \ln T! - \sum_i \sum_j \ln T_{ij} ! \quad (2-3)$$

Wilson suppose que les effectifs T_{ij} sont très importants de façon à pouvoir utiliser l'approximation de Stirling, c'est-à-dire $\log X! = X \log X - X$.

$$\ln W = (T \ln T - T) - \sum_i \sum_j (T_{ij} \ln T_{ij} - T_{ij}) \quad (2-4)$$

Etant donné que $\sum_i \sum_j T_{ij} = T$,

$$\begin{aligned} \ln W &= T \ln T - T - \sum_i \sum_j T_{ij} \ln T_{ij} + T \\ \ln W &= -T \sum_i \sum_j \frac{T_{ij}}{T} \ln \frac{T_{ij}}{T} \end{aligned} \quad (2-5)$$

Cette dernière expression définit l'entropie du système I^*J . L'entropie moyenne, notée H , est obtenue en divisant $\log W$ par T , soit :

$$H = -\sum_i \sum_j P_{ij} \ln P_{ij} \quad (2-6)$$

où $P_{ij} = \frac{t_{ij}}{T}$ représente la probabilité qu'une personne effectue un déplacement de i

vers j .

$$\sum_i \sum_j P_{ij} = 1$$

Comme le souligne Fustier (1988), « il faut se garder cependant d'interpréter ces probabilités comme une tentative de formalisation des comportements individuels ». Wilson ne s'intéresse pas à l'individu, sauf en tant qu'élément d'une foule dont il cherche à préciser la configuration. C'est le comportement global qui passe au premier plan de l'analyse. Pour mieux saisir la place de l'individu dans le groupe, il convient de se rappeler que l'entropie a été conçu pour mesurer le degré de désordre atteint par un système gazeux. En effet, dans l'état d'avancement des théories moléculaires, il n'est pas possible de déterminer simultanément la vitesse et la position d'une particule donnée. Mais au niveau de l'observation macroscopique, l'évolution de la configuration générale d'un système est tout à fait prévisible (entropie vient du grec qui signifie évolution). En

particulier, si la quantité totale d'énergie est nulle, aucun mouvement n'est observé (l'énergie cinétique des particules est nulle), toutes les particules sont rassemblées au même endroit et l'on dit que le degré de désordre du système est à son minimum. A ce moment, l'entropie est nulle. Mais au fur et à mesure que la contrainte énergétique se desserre, c'est-à-dire lorsqu'on augmente progressivement la consommation d'énergie, les particules s'animent de mouvements individuellement désordonnés et totalement imprévisibles, mais conduisant à un degré de désordre globalement mesurable : l'entropie augmente. Lorsque l'on transpose cette analyse au système spatial, on considère que l'individu est au système spatial ce que la particule est au système gazeux : il est imprévisible sauf dans le cas particulier où l'entropie du système est nulle. En effet, si tous les déplacements ont la même origine i et le même aboutissement j , le système est parfaitement ordonné (tous les effectifs se concentrent dans la même case du tableau de contingence). Cette distribution particulière ne peut être obtenue que d'une seule manière ($W=1$) puisque $t_{ij} = T$ et $t_{i'j'} = 0$ ($i' \neq i$, et $j' \neq j$). L'entropie atteint donc sa valeur minimale pour la distribution la moins fréquente. Tout se passe comme si on obligeait une collectivité à résider au même endroit et que l'on interdisait à ses éléments de se rendre ailleurs que dans un seul lieu. En revanche si l'on diminue le poids des contraintes précédentes pour ne conserver que la seule contrainte physique $\sum_i \sum_j t_{ij} = 1$, la valeur

maximum de l'entropie est obtenue pour $H = \ln mn$. Le degré de désordre le plus élevé atteint par le système spatial correspond en fait à une diffusion uniforme de l'effectif total dans chaque case du tableau. Il s'agit également de la distribution la plus fréquente. En définitive, le degré de désordre caractérisant un système spatial se trouve compris entre ces deux valeurs extrêmes, car le nombre des contraintes est moins élevé que dans le premier cas mais plus élevé que dans le second. Dans le cas d'une situation avec le maximum de contraintes (quand par exemple un planificateur territorial tout puissant décide de minimiser la consommation du sol et de maximiser les économies d'échelle dans la construction et le transport), l'habitat résidentiel et les postes de travail sont concentrés respectivement dans une seule zone : on a là une condition d'ordre maximum et de probabilité minimale. En revanche, faute de contraintes, le principe d'entropie pousse le système vers le désordre maximum et la probabilité maximum, c'est-à-dire vers une situation à répartition spatiale homogène des deux activités.

132. Maximisation de l'entropie sous contraintes

D'après ce qui précède, la distribution qui a le plus de chance d'être observée en pratique n'est pas donnée par une diffusion uniforme des flux à l'intérieur du système car le degré de désordre de cette distribution est limité par l'introduction de contraintes dans le processus de maximisation de l'entropie. Le système se trouve dans une situation intermédiaire entre les hypothèses extrêmes de contraintes maximale et minimale. Wilson propose de formaliser trois contraintes :

$\sum_i T_{ij} = O_i$, qui signifie que le nombre total de personnes qui se déplacent à partir d'une zone donnée ne doit évidemment pas excéder le nombre de ses résidents.

la contrainte en destination $\sum_i T_{ij} = D_j$, qui pose que le nombre total de personnes se déplaçant dans une zone donnée ne peut excéder la capacité d'accueil de cette zone.

la contrainte de coût $\sum_{i,j} c_{ij} T_{ij} = C$, pour laquelle l'ensemble des déplacements doit être réalisé à l'intérieur d'une enveloppe budgétaire globalement donnée.

La solution analytique au problème, à savoir la valeur des T_{ij} , s'obtient en maximisant la fonction d'entropie sous les trois contraintes qui fournissent l'information sur le macro-état du système. On construit le Lagrangien L :

$$L = \sum_i \sum_j (T_{ij} \ln T_{ij} - T_{ij}) + \sum_i \lambda_i (O_i - \sum_j T_{ij}) + \sum_j \mu_j (D_j - \sum_i T_{ij}) + \beta (C - \sum_i \sum_j c_{ij} T_{ij}) \quad (2-7)$$

$$\frac{\partial L}{\partial T_{ij}} = -\ln T_{ij} - \lambda_i - \mu_j - \beta \sum_i \sum_j c_{ij} = 0 \quad (2-8)$$

$$T_{ij} = e^{-\lambda_i - \mu_j - \beta c_{ij}} \quad (2-9)$$

On pose,

$$a_i = \frac{e^{-\lambda_i}}{O_i} = \frac{1}{\sum_j e^{-\mu_j} e^{-\beta c_{ij}}} \quad (2-10)$$

et

$$b_j = \frac{e^{-\mu_j}}{D_j} = \frac{1}{\sum_i e^{-\lambda_i} e^{-\beta c_{ij}}} \rightarrow \rightarrow (2-11)$$

par substitution on obtient :

$$a_i = 1 / \sum_j b_j D_j e^{-\beta c_{ij}} \rightarrow \rightarrow (2-12)$$

et

$$b_j = 1 / \sum_i A_i O_i e^{-\beta c_{ij}} \quad (2-13)$$

En remplaçant $e^{-\lambda_i}$ et $e^{-\mu_j}$ par leur expression dans T_{ij} on obtient la spécification du modèle gravitaire :

$$T_{ij} = a_i b_j O_i D_j e^{-\beta c_{ij}} \quad (2-14)$$

a_i et b_j s'apparentent, en quelque sorte, à des poids moléculaires associés aux masses O_i et D_j (Fustier, 1988).

133. Intérêt et limite de l'analyse

Les résultats de l'approche thermodynamique de l'interaction spatiale suggèrent les réflexions suivantes :

La spécification proposée correspond d'une manière générale à la spécification gravitationnelle, avec O , D , c qui remplacent les masses et la distance physique.

On démontre que la formulation exponentielle de la fonction de friction spatiale procède de l'hypothèse qui veut que celui qui se déplace perçoive linéairement le coût du déplacement ; si l'on suppose qu'il perçoit ce coût de façon décroissante avec la distance déjà parcourue (par exemple une fonction logarithmique de la distance), on obtient la fonction puissance propre au modèle gravitationnel. Ainsi, la fonction de résistance aux déplacements est liée au coût de transport global par l'intermédiaire du paramètre β dont le rôle est analogue à celui de l'exposant de la distance dans les modèles traditionnels. Mais à la différence des modèles dérivés empiriquement, la valeur du taux d'atténuation trouve ici une justification théorique : une forte estimation de β signifie que la contrainte économique imposée aux déplacements est sévère (C faible) et vice versa. En outre, la fonction exponentielle possède l'avantage de faire correspondre une valeur finie à n_{ik} lorsque $c_{ik} = 0$.

Le modèle présente une série de constantes A_i et B_j au nombre $n+m$ au lieu de la seule constante k du modèle gravitationnel. Cela vient de ce qu'on veut respecter pour l'ensemble du système les $n+m$ contraintes données par la population dans les zones d'origine et de destination, et non seulement la contrainte fournie par la population totale.

La critique qui peut être adressée est que « la description des flux observés que permettent de réaliser les modèles dérivés de cette approche ne semble pas être de

meilleure qualité que les estimations fournies par des modèles plus classiques » (Fustier, 1988). Cette remarque invite à relativiser l'originalité de la formulation théorique de cette classe de modèles. Plus importante est la question de la légitimité de l'approche ayant produit la formulation.

14. Les analyses du comportement spatial individuel

Après avoir présenté une macro-analyse du comportement spatial, nous nous intéressons à présent à une analyse du comportement spatial menée au niveau individuel.

Lorsqu'une personne est amenée à se déplacer, le choix d'une destination résulte d'un processus de décision qui peut donner lieu à une analyse probabiliste du comportement spatial ou à une approche plus économique menée dans le cadre de la théorie de l'utilité.

141. L'approche probabiliste des opportunités intermédiaires

La notion d'« opportunités intermédiaires » a été introduite par Stouffer (1940). Pour une personne quittant une zone donnée, une opportunité intermédiaire est une occasion de s'arrêter avant la destination prévue. Le principal postulat de ce modèle consiste à considérer que la probabilité de choisir une destination particulière est proportionnelle au nombre d'opportunités satisfaisant le motif considéré à la destination et inversement proportionnel à toutes les opportunités proches de la zone origine du voyageur, qui sont appelées les opportunités intermédiaires ou opportunités interposées.

Une présentation de cette approche est proposée par Camagni (1996). Soit un individu qui va du centre a dans une certaine direction en quête d'un lieu où fixer par exemple sa résidence, il voit s'offrir à lui un nombre indéfini d'opportunités de s'arrêter à une certaine distance du centre. La probabilité qu'il a de s'arrêter sur une couronne circulaire de largeur Δs , où il trouve Δx_s opportunités de s'arrêter, est inversement proportionnelle au nombre d'opportunités intermédiaires accumulées x_{as} qu'il rencontre sur son parcours. Soit donc Δ / le nombre de personnes qui se déplacent entre a et s , nous avons :

$$\frac{\Delta I_{as}}{\Delta s} = \frac{k}{\Delta s} \frac{\Delta x_s}{x_{as}} \quad (2-15)$$

Le modèle est très semblable aux modèles gravitaires si l'on interprète Δx_s comme une mesure de la force d'attraction et donc de la masse, des localisations situées sur la couronne s et x_{as} comme une mesure de la distance en termes d'opportunités dispersées sur l'ensemble du territoire.

Une seconde formulation en termes discrets conduit à introduire explicitement dans le modèle une mesure de la dimension de la zone de départ (sous la forme d'un nombre global de personnes qui quittent a) et une mesure des opportunités présentes dans la zone j d'arrivée (sous la forme du nombre de personnes qui s'arrêtent en zone j indépendamment de leur zone d'origine) ; ainsi la formulation devient alors :

$$\Delta I_{aj} = k \frac{\Delta x_a \Delta x_j}{x_{aj}^\gamma} \quad (2-16)$$

La formulation donnée par Schneider en termes de probabilité d'arrêt apparaît plus convaincante et ses résultats sont identiques. La spécification de l'exponentielle négative qui traduit l'effet de la distance provient ici du fait que le nombre des aires pour un arrêt alternatif possible s'accroît à raison de $\pi \delta^2$ avec augmentation de la distance à partir de a . Si s est la densité supposée constante d'opportunités par unité de surface, on obtient :

$$I_{aj} = k \frac{\Delta x_a \Delta x_j}{e^{s\pi\delta^2}} \quad (2-17)$$

142. L'approche fondée sur la théorie de l'utilité

On peut encore déduire la relation gravitationnelle d'interaction spatiale selon une approche différente procédant d'une extension de la théorie du choix du consommateur à la décision de déplacement. Tout déplacement est source d'utilité pour celui qui l'entreprend. Cette idée a permis certains auteurs de transposer les apports de la théorie des choix individuels de consommation à l'analyse du comportement spatial et de considérer le voyageur comme un consommateur de déplacements. Ainsi sous des contraintes budgétaires le consommateur essaiera de maximiser sa fonction d'utilité des déplacements. Dans ce cadre, plusieurs approches ont été proposées selon la définition de l'utilité, conduisant *in fine* à une reformulation et une justification des modèles gravitaires fondées sur l'analyse des comportements individuels.

Niedercorn et Bechdolt (1969) affirment qu'une personne k se déplace pour entrer en contact avec d'autres personnes. Ils supposent que l'utilité retirée par k est une fonction croissante U du nombre de contacts réalisés, soit $U(k T_{oj})$. Dans la zone de destination, plusieurs personnes peuvent être visitées ; le nombre total de personnes que l'individu k désire visiter est proportionnel à la population P_j de cette zone, mais à chaque déplacement k ne peut rencontrer qu'une seule personne. Dans ces conditions, le niveau d'utilité correspondant à l'ensemble des contacts établis par k en j est donné par :

$${}_k U_{oj} = a P_j U({}_k T_{oj}) \quad 0 < a < 1 \quad (2-18)$$

Pour l'ensemble des destinations, l'utilité globale est supposée correspondre à la somme des utilités précédentes :

$${}_k U_o = a \sum_j P_j U({}_k T_{oj}) \quad (2-19)$$

Bien entendu, la valeur de ${}_k T_{oj}$ ne peut être infinie, car l'agent possède des moyens

limités en argent ou en temps. Niedercorn et Bechdolt introduisent successivement ces deux sortes de contraintes. Considérons à titre d'exemple la contrainte monétaire :

$${}_k M_o \geq r \sum_j D_{oj} {}_k T_{oj} \quad (2-20)$$

r représente le coût unitaire de transport ;

D_{oj} la distance entre o et j ;

${}_k M_o$ le budget-transport de k (au lieu o).

Une fois spécifiée la structure de la fonction U , l'équilibre du « consommateur de déplacements » est obtenu en maximisant ${}_k U_o$ compte tenu de la contrainte précédente. Ainsi dans le cas où $U({}_k T_{oj}) = \log {}_k T_{oj}$ on obtient⁶ :

$${}_k T_{oj}^* = \frac{({}_k M_o / r) (P_j / \sum_j p_j)}{D_{oj}} \quad (2-21)$$

soit :

$$I_{oj} = \sum_k {}_k T_{oj}^* \quad (2-22)$$

le nombre total des déplacements effectués par les résidents de la zone-origine vers j .

$$M_o = \sum_k {}_k M_o \quad (2-23)$$

le budget total que les habitants de la zone-origine consacrent aux déplacements.

Niedercorn et Bechdolt admettent que M_o est proportionnel à la population de cette zone :

$$M_o = u P_o$$

On obtient finalement l'expression d'un modèle directionnel de flux :

⁶ Niedercorn et Bechdolt envisagent également le cas d'une fonction puissance.

$$I_{oj} = G \frac{P_o (P_j / \sum_j P_j)}{D_{oj}} \quad (2-24)$$

où

$$G = \frac{u}{r}$$

La structure de ces modèles de gravitation résulte d'une analyse familière à l'économiste. Cependant, il nous semble que la transposition de la théorie micro-économique de la demande de consommation à celle de la demande de déplacements établie par Niedercorn et Bechdolt n'est pas adéquate. En effet, nous avons montré dans le chapitre précédent que la demande de déplacements était une demande intermédiaire. Il nous semble que l'utilité d'un déplacement ne peut pas être établie en fonction du nombre de déplacements effectués. Aussi, plus qu'une simple analogie, il s'agit d'analyser le comportement individuel dans le cadre de deux activités « concurrentes » : le consommateur de déplacements est avant tout un consommateur de biens économiques. Aussi il conviendrait que les arguments de la fonction d'utilité ne se limitent pas exclusivement au nombre des déplacements et que la contrainte budgétaire fasse état de la relation existant entre le budget de transport et le revenu que le consommateur entend consacrer à l'achat des autres biens. Se limitant à l'analyse du comportement spatial au sens strict, Niedercorn et Bechdolt (1970, 1972) préfèrent adopter le point de vue de la « nouvelle théorie » du consommateur (Lancaster, 1966) en considérant que les caractéristiques des déplacements constituent la source directe d'utilité. Les arguments de la fonction d'utilité sont définis par les quantités de caractéristiques des déplacements et non par le nombre de ces derniers.

De même que l'hypothèse des opportunités interposées, l'approche de l'interaction spatiale en termes d'optimisation de l'utilité s'applique uniquement à une partie des phénomènes que l'on peut étudier ; elle exige des hypothèses *ad hoc* sur le comportement individuel et sur la manière de percevoir les coûts et les avantages de la mobilité. Ces approches peuvent être considérées comme les prémisses de l'analyse des choix discrets avec la théorie de l'utilité aléatoire (McFadden, 1973). Parmi les modèles d'interaction spatiale, les modèles gravitaires conservent une place primordiale bien que l'on leur ait reproché leur manque de fondement théorique économique. En outre, certains auteurs, notamment Anas, ont contribué à apporter des fondements économiques aux modèles gravitaires en démontrant l'identité existant entre les modèles gravitaires et les modèles de choix discrets.

15. La relation entre les modèles d'interaction spatiale et les modèles de choix discrets

Les fortes similitudes entre les modèles d'interaction spatiale fondés sur la maximisation de l'entropie et ceux établis sur le principe de la maximisation de l'utilité ont été soulignées très tôt. Cependant, malgré la recherche d'une approche synthétique, ces

deux analyses sont restées disjointes, ceci étant principalement lié à l'utilisation de données de nature différente. Les modèles d'interaction spatiale entropique nécessitent des données agrégées, tandis que les modèles comportementaux de la demande requièrent des données désagrégées. C'est Anas en 1983 qui a démontré, qu'à un même niveau d'agrégation, ces deux approches pouvaient être considérées comme strictement identiques. Anas met en évidence que les deux approches ne se fondent pas sur les mêmes paradigmes. Pourtant, « *the two paradigms imply mutually consistent and fully equivalent model search and model specification strategies : one is rooted in micro-behavioral postulates, the other in macro-statistical information theory* » (Anas, 1983, p. 14). Pour lui, les modèles comportementaux de demande qui découlent des travaux de McFadden (1973) et les modèles de maximisation de l'entropie, qui découlent des travaux de Wilson (1970), peuvent être considérés comme deux aspects équivalents d'un même problème. Anas est parvenu à plusieurs résultats. Le premier est que le modèle logit multinomial, qui résulte originellement de l'approche probabiliste de maximisation de l'utilité aléatoire, peut être dérivé également à partir de l'approche de maximisation de l'entropie. Le deuxième résultat est la démonstration que la méthode de maximisation de vraisemblance et celle de maximisation de l'entropie conduisent à des estimations identiques des coefficients du modèle logit multinomial. Dans un troisième temps, Anas démontre que le modèle gravitaire à double contrainte peut être considéré comme un modèle de comportement pour le choix d'une paire d'origine-destination.

Anas résume les hypothèses de l'approche des choix discrets dérivant le modèle logit multinomial comme suit :

H_1 . Tous les individus de la population ont la même fonction d'utilité, laquelle est linéaire pour une transformation prédéterminée des attributs (tel que log-linéaire, quadratique, etc.),

H_2 . Les coefficients d'utilité ne varient pas parmi la population des décideurs (c'est-à-dire qu'il n'y a pas de variations de préférences),

H_3 . La partie aléatoire de l'utilité est additive et est distribuée selon une loi de Weibull,

H_4 . Chaque individu cherche à maximiser son utilité, en choisissant l'alternative qui offre la plus grande satisfaction.

L'utilité de chaque alternative i est spécifiée ainsi :

$$U_j^h = \alpha_{0j} + \sum_k \alpha_k X_{jk}^h + \varepsilon_j^h \quad (2-25)$$

où U_j^h est l'utilité perçue pour l'alternative j par le décideur h , $[\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_j, \dots, \alpha_k]$ sont des coefficients d'utilité, X_{jk}^h est la valeur du $k^{\text{ième}}$ attribut de l'alternative j pour

le décideur $h, [\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_j]$ est le vecteur stochastique d'utilité, α_{oj} est une contrainte.

Le modèle de choix de maximisation de l'utilité dérive de :

$$P_i^h = \Pr [U_i^h > U_j^h, \forall j \neq i] \quad (2-26)$$

Le modèle logit multinomial est spécifié lorsque l'on suppose que chaque élément aléatoire est indépendamment et identiquement distribué selon une loi de Weibull.

Il vient que :

$$P_i^h = \frac{\exp \left\{ \beta_{oi} + \sum_k \beta_k X_{ik}^h \right\}}{\sum_j \exp \left\{ \beta_{oj} + \sum_k \beta_k X_{jk}^h \right\}} \quad (2-27)$$

A contrario, l'approche de maximisation de l'entropie à la Wilson n'est pas fondée sur des postulats micro-économiques des comportements mais sur les principes de la théorie de l'information. Anas démontre que cette approche permet d'obtenir *in fine* la spécification du modèle logit multinomial, sous les hypothèses suivantes :

H₅ . La prédiction la plus probable de la probabilité de choix est celle qui minimise l'information ou maximise l'entropie sous contraintes,

H₆ . Les probabilités de choix prédites doivent répliquer les propriétés macroscopiques du système agrégé des individus.

Anas établit que le problème de minimisation de l'information (ε) (ou de maximisation de l'entropie à la Wilson), correspond au problème de maximisation de vraisemblance du modèle logit multinomial.

$$\text{Min} - \varepsilon = \sum_h \sum_j P_j^h \ln P_j^h \quad (2-28)$$

sous contraintes :

$$\sum_j P_j^h = 1 \quad h: 1 \dots H \quad (2-29)$$

$$\sum_h P_j^h = \sum_h \delta_j^h \quad j: 1 \dots J \quad (2-30)$$

$$\sum_h \sum_j P_j^h X_{jk}^h = \sum_h \sum_j \delta_j^h X_{jk}^h \rightarrow \rightarrow k=1...K \rightarrow \rightarrow \rightarrow (2-31)$$

Dans cette formulation, les inconnues sont les probabilités P_j^h . Nous cherchons la probabilité la plus probable, mais en prenant soin que ces prédictions répliquent les observations agrégées du système. Ces exigences sont imposées dans les contraintes. Par la méthode du Lagrangien, on obtient :

$$\mathcal{L} = \sum_h \sum_j P_j^h \ln P_j^h - \sum_h \theta_h \left[\sum_j P_j^h - 1 \right] - \sum_{oj} \lambda_{oj} \left[\sum_j P_j^h - N_{oj} \right] - \sum_k \lambda_k \left[\sum_h \sum_j P_j^h X_{jk}^h - \bar{X}_k \right] \quad (2-32)$$

où θ_h , λ_{oj} et λ_k sont des multiplicateurs de Lagrange, et :

$$N_{oj} = \sum_h \delta_j^h \quad (2-33)$$

$$\bar{X}_k = \sum_j \sum_h \delta_j^h X_{jk}^h \quad (2-34)$$

Les conditions du premier ordre sont :

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial P_j^h} = 1 + \ln P_j^h - \theta_h - \lambda_{oj} - \sum_k \lambda_k X_{jk}^h = 0 \quad (2-35)$$

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \theta_h} = \sum_j P_j^h - 1 = 0 \quad (2-36)$$

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \lambda_{oj}} = \sum_h P_j^h - \sum_h \delta_j^h = 0 \quad (2-37)$$

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \lambda_k} = \sum_h \sum_j P_j^h X_{jk}^h - \sum_j \sum_h \delta_j^h X_{jk}^h = 0 \quad (2-38)$$

A partir de (2-35) :

$$P_j^h = \exp \left(-1 + \theta_h + \lambda_{oj} + \sum_k \lambda_k X_{jk}^h \right)$$

$$P_j^h = \exp (-1 + \theta_h) \exp (\lambda_{oj} + \sum_k \lambda_k X_{jk}^h) \quad (2-39)$$

en substituant (2-38) dans (2-29) on trouve :

$$\exp (-1 + \theta_h) = 1 / \sum_j \exp (\lambda_{oj} + \sum_k \lambda_k X_{jk}^h) \quad (2-40)$$

et en substituant cela dans (2-38), on obtient :

$$P_i^h = \frac{\exp (\lambda_{oi} + \sum_k \lambda_k X_{ik}^h)}{\sum_j \exp (\lambda_{oj} + \sum_k \lambda_k X_{jk}^h)} \quad (2-41)$$

qui est le modèle logit multinomial identique à celui proposé au début.

Ainsi, Anas montre que le modèle de maximisation de l'utilité aléatoire fondé sur les hypothèses H_1 - H_4 , conduisent à des résultats identiques que le modèle de maximisation de l'entropie fondée sur les hypothèses H_5 - H_6 . La première approche est comportementale tandis que la dernière est purement informationnelle et statistique, mais le résultat est le même. Et Anas souligne, « *this means that analysts who are following Wilson's paradigm and others following McFadden's are engaged in precisely the same endeavor, of which they have different - indeed, opposed - views* ».

L'équivalence entre ces deux approches est un élément théorique fondamental, dans la mesure où il fournit aux modèles d'interaction spatiale, en général, et aux modèles d'entropie en particulier, la base micro-économique et comportementale qu'ils n'avaient pas.

Le principe d'interaction spatiale, considéré également par Camagni (1996) comme la demande de mobilité et de contacts, donne une mesure du lien transport-urbanisation sans toutefois présumer d'une relation de causalité. Un concept relativement proche est celui de l'accessibilité. Le principe d'accessibilité est à la base de l'organisation interne de l'espace urbain, et procède de la compétition des différentes activités économiques entre elles pour s'assurer les localisations les plus avantageuses (Camagni, 1996).

Section 2. La notion d'accessibilité au centre de la relation transport - urbanisation

Dans une première approche, on entend par accessibilité le franchissement de la barrière

opposée par l'espace au mouvement des personnes et des choses, comme à l'échange des biens, des services et des informations. L'accessibilité est fortement liée à la notion d'interaction spatiale développée ci-avant. Les besoins de déplacements naissent des besoins d'échanges, d'interactions spatiales. L'espace crée une séparation entre les agents qui désirent interagir en vue d'accroître leur utilité. L'interaction spatiale se réalise via le réseau de transport. C'est l'offre de transport qui permet d'atténuer la friction spatiale, entravant la mobilité. Elle permet ainsi aux espaces d'être accessibles. L'accessibilité est le facteur qui permet à l'entreprise de disposer rapidement de tous les facteurs de production et des biens intermédiaires dont elle a besoin, sans devoir supporter le coût et/ou le temps de transport. Elle est la possibilité de recueillir le maximum d'informations stratégiques avec un avantage temporel sur ses concurrentes ; pour les personnes, c'est le pouvoir de bénéficier de services rares contraints à des localisations spécifiques (Camagni, 1996). Le principe d'accessibilité est à la base de l'organisation interne de l'espace urbain, et procède de la compétition des différentes activités économiques entre elles pour s'assurer les localisations les plus avantageuses. Par ailleurs, l'accessibilité « est un des principes fondateurs de l'économie urbaine (et spatiale au sens large) » (Camagni, 1996). Ainsi, l'accessibilité gouverne les choix de localisation des agents économiques, « qui donnent lieu, par des effets cumulatifs, à la structuration globale de l'espace, aux niveaux macro et microterritorial ». Par ailleurs, la notion d'accessibilité joue un rôle important dans l'analyse des systèmes de transport. En effet, l'amélioration de l'accessibilité constitue un objectif de base de tout projet de transport.

Depuis une trentaine d'années, différentes approches ont été proposées à propos de l'accessibilité. Dans un premier temps, et essentiellement avec les travaux de Hansen (1959), l'accessibilité a été envisagée comme une mesure physique de la facilité de mouvement. Plus tard, Wilson (1967) a obtenu ces mesures à partir des facteurs de balancement des modèles entropiques d'interactions spatiales, procurant à ces mesures une interprétation mathématique et statistique plus rigoureuse. Puis, ces indicateurs ont été associés à des mesures du surplus spatialisé du consommateur (Neuberger, 1971 ; Williams, 1976). Koenig (1974) propose une théorie économique de l'accessibilité qui cherche à évaluer l'utilité procurée par la possibilité d'accéder aux différents points d'intérêt de la ville par l'intermédiaire du réseau de transport. Enfin, la théorie de l'utilité aléatoire apporte une interprétation économique dans la définition des mesures d'accès (Domencich, McFadden, 1975, Williams, 1977, Ben-Akiva, Lerman, 1979). La notion d'accessibilité est ainsi un concept relativement ancien et récurrent, elle a été développée en géographie, en économie urbaine et régionale et en économie des transports. De par la multiplicité des usages auxquels elle est associée, son appréhension et ses mesures sont plurielles.

21. Définitions

C'est en 1959 que Hansen proposait les premières définitions et utilisations du concept d'accessibilité. L'accessibilité est une notion plus riche que celle de proximité (dans son acception courante). Initialement, le terme de proximité exprimait deux notions différentes : une distance faible et un accès à une autre unité ou fonction économique. Si

les deux notions étaient fondées dans le même mot, c'est parce qu'une distance kilométrique importante était perçue comme ce qui empêche « l'accès à » et inversement une distance réduite comme ce qui donne « l'accès à » (Molin, Vulin, 1992). Certaines évolutions sont venues troubler progressivement cette perception de la proximité : une hiérarchisation des performances de vitesse de plus en plus poussée entre les différents modes de transport entraîne tout d'abord que « l'accès à » peut être identique en se situant à deux distances différentes, mais en utilisant des modes de transport eux aussi différents. Dans la mesure où les différents réseaux de transport ont des couvertures spatiales qui sont imparfaites, qui introduisent *de facto* une différenciation spatiale, à égalité de distance « l'accès à » peut être très différent. Enfin, le phénomène de congestion, notamment urbaine, a pour corollaire qu'une distance géographique faible ne donne pas systématiquement « l'accès à ». Dès lors, le terme de proximité devient trop vague pour exprimer les deux idées de plus en plus disjointes de « distance faible » et « d'accès à » : coût et durée du déplacement sont de moins en moins proportionnels à la distance parcourue. Cela introduit la nécessité de la mesure de « l'accès à » : la notion d'accessibilité.

De façon générale, on entend par accessibilité le franchissement de la barrière opposée par l'espace au mouvement des personnes et des choses, comme à l'échange des biens, des services et des informations (friction spatiale). C'est une mesure de la séparation spatiale des activités humaines. Elle correspond à la facilité avec laquelle des activités peuvent être atteintes à partir d'une localisation donnée. Les mesures d'accessibilité sont fondées sur le principe que l'espace contraint le nombre d'opportunités accessibles. Au delà de ce point de vue général, les définitions et surtout les mesures qui en découlent diffèrent largement. Gould (1969, in Morris, *et alii*, 1978) souligne le caractère glissant de l'accessibilité, en rappelant qu'il s'agit d'un terme que chacun utilise communément jusqu'à ce qu'il soit confronté au problème de définition et de mesure. En outre, la notion d'accessibilité ne peut pas se résumer à une mesure de séparation spatiale, c'est-à-dire à une distance géographique, distance-temps, distance-réseau, mais doit intégrer les éléments qui fondent l'interaction spatiale. La notion d'accessibilité prend en compte à la fois l'élément de séparation spatiale, ou élément résistant du déplacement, c'est-à-dire les coûts de transport, et l'élément moteur, c'est-à-dire le but du déplacement qui est la réalisation d'une activité urbaine. Enfin, certains auteurs ont souligné l'importance de fonder les mesures d'accessibilité au niveau de l'individu et sur une théorie comportementale. Dans ce cadre, les mesures d'accessibilité ne sont plus seulement une mesure agrégée du niveau de service en fonction de destinations potentielles, mais une mesure désagrégée en fonction du type d'individu qui se déplace, du motif, etc.

22. Des mesures de l'accessibilité

L'accessibilité fait l'objet de plusieurs propositions de définition et de mesures. Il existe des variations considérables sur les éléments que l'indicateur peut inclure, et sur la manière dont ils sont mesurés et combinés. Le choix d'une mesure d'accessibilité dépend du type d'application envisagé.

Dans un premier temps, il convient de distinguer les indicateurs d'accessibilité

relative de ceux d'accessibilité totale. L'accessibilité relative représente la relation ou le degré de connexion entre deux points, tandis que l'accessibilité totale décrit la relation ou le degré d'interconnexion entre un point donné et tous les autres à l'intérieur d'un ensemble de points dans l'espace. La première est une mesure de l'effort nécessaire pour effectuer un déplacement, tandis que la seconde est une sorte de mesure des opportunités totales de déplacements sous contrainte du système de transport.

Deux approches sont communément utilisées afin de mesurer l'accessibilité. D'une part les mesures de type gravitaire, développées ci-après, et d'autre part, les mesures isochroniques indiquant le nombre d'opportunités qui peuvent être atteintes en un temps ou une distance donnés. Les mesures gravitaires sont souvent préférées car contrairement aux mesures isochroniques, elles considèrent toutes les possibilités finales des déplacements et évitent ainsi l'introduction d'une frontière spatiale subjective et parfois arbitraire.

Puisque la plupart des déplacements sont des moyens pour atteindre un objectif, effectuer une activité, une mesure de l'accessibilité qui reflète la distribution des activités à l'intérieur de la ville semble plus pertinente qu'une mesure qui décrit simplement la facilité de traverser un espace par un système de transport donné, c'est-à-dire un indicateur de temps ou coût de transport.

La mesure de l'accessibilité la plus employée découle de celle proposée par Hansen (1959).

$$A_{ik} = \sum_j O_{jk} f(c_{ij}) \quad (2-42)$$

où

A_{ik} est l'accessibilité de la zone i aux opportunités de types k dans les zones $j = 1, \dots, n$;

O_{jk} est une mesure des opportunités de type k offertes dans la zone j ;

c_{ij} est une mesure de la séparation spatiale entre i et j ;

$f(c_{ij})$ est la fonction de résistance aux déplacements.

A partir de cette formule de base peut se décliner un ensemble de mesures. Il est hors de notre propos de présenter l'ensemble de ces mesures disponibles pour chaque problème d'application en planification des transports, mais simplement d'en montrer la diversité. En effet, premièrement, il existe autant de mesures d'accessibilité que de types d'opportunités : emplois totaux, emplois de commerce, emplois tertiaires, activités de loisirs, etc. Deuxièmement, la mesure de la séparation spatiale peut être exprimée de différentes façons : en termes de distance, de temps réel ou perçu, de coût, de temps ou coût généralisé. Du moment où la séparation spatiale est mesurée en temps ou coût de

transport, cela implique de considérer les modes de transports utilisés. La mesure de l'accessibilité peut aussi bien considérer un temps ou coût multimodal, indicateur de la performance globale du système de transport urbain, mais également prendre en considération le temps ou coût en automobile, ou en transport collectif, ou encore à pied, etc. Enfin, la fonction de résistance aux déplacements peut être spécifiée de différentes manières. De Crecy (1979) indique que s'il s'agit de la « principale originalité de l'accessibilité, elle en est aussi la difficulté essentielle tant sur le plan théorique de sa signification que sur celui plus pratique de sa formulation. On saisit bien intuitivement le sens de cette fonction : $f(c)$ indique le degré d'accessibilité d'une opportunité située à la distance c de l'usager, ou encore la facilité qu'il ressent pour accéder à cette opportunité. Mais le problème capital est de passer de cette notion intuitive, de cette « facilité ressentie » éminemment dépendante de l'individu et de ses paramètres propres, à une formulation pratique et opérationnelle ». Pour aboutir à cette formulation, cet auteur discerne deux démarches différentes : la première restant basée sur une interprétation intuitive et qui amène à proposer diverses fonctions empiriques, la deuxième se fondant au contraire sur les hypothèses classiques de comportement rationnel de la micro-économie. Nous développerons ce deuxième point dans le paragraphe suivant. Concernant la démarche empirique, la fonction de pondération des opportunités est nécessairement décroissante. En effet, plus une opportunité est proche, plus elle est considérée comme accessible. A distance nulle, l'accessibilité est maximum, à distance infinie, elle est nulle. Les fonctions les plus couramment utilisées sont du type exponentielle négative, ou hyperbolique (en $1/d$ ou $1/d^2$). Mais ces fonctions ont l'inconvénient de pondérer très fortement les distances faibles, de décroître très rapidement et de pondérer de manière très faible et uniformément les distances élevées. *A contrario*, la fonction puissance, qui peut être également employée, conduit à pondérer plus fortement les distances élevées. Certains auteurs ont proposé l'utilisation de courbes de pondération normales (ou du moins la moitié droite d'une courbe normale) qui ont l'avantage de présenter une sorte de « plateau » pour les distances faibles, correspondant aux secteurs considérés comme parfaitement accessibles, puis une partie où la décroissance est rapide, et où les opportunités sont moyennement, ou relativement accessibles, et enfin une dernière partie tendant asymptotiquement vers zéro, où l'accessibilité devient très faible, voire nulle.

La spécification standard proposée par Hansen a été remise en cause par certains auteurs, notamment par Ben-Akiva et Lerman (1979), parce qu'elle évacue toute considération aux personnes intéressées par cette accessibilité, c'est-à-dire les bénéficiaires de l'accessibilité. Avec cette formulation, on considère implicitement que tous les individus de la zone i bénéficient du même niveau d'accessibilité, en niant le fait que les individus peuvent percevoir cet avantage de manière différente selon leurs caractéristiques socio-économiques, le motif du déplacement, etc. En effet, la perception de l'accessibilité varie selon les individus, et une agrégation zonale fournit une base inadéquate pour reproduire des variations entre des circonstances individuelles. En définitive, il n'existe pas un indicateur mais des indicateurs d'accessibilité.

23. Théorie économique et accessibilité

Certains auteurs ont cherché à dépasser la notion d'accessibilité comme mesure physique, empirique, et ont tenté d'apporter des fondements théoriques concernant les comportements de déplacement des agents économiques, afin, entre autres, de justifier la spécification de telle ou telle fonction de pondération des opportunités. En outre, ces mêmes auteurs ont cherché à théoriser la relation intuitive existant entre un changement perceptible de l'accessibilité physique et les modifications des comportements de déplacements. Différentes approches théoriques, fondées sur des modèles de comportements micro-économiques des consommateurs, ont été spécifiés afin d'exprimer la relation causale de façon mathématique. Koenig (1974) propose, dans le cadre de l'évaluation économique, une théorie économique de l'accessibilité qui cherche à évaluer l'utilité procurée par la possibilité d'accéder aux différents points d'intérêt de la ville par l'intermédiaire du réseau de transport. Ben-Akiva et Lerman (1979) proposent une mesure de l'accessibilité basée sur les modèles de l'utilité aléatoire.

231. La théorie économique de l'accessibilité urbaine de Koenig

Koenig (1974) part du constat que la mesure de l'utilité de l'utilisateur d'un système de transport ne saurait être réduite à une mesure de la séparation spatiale même exprimée en termes de coûts généralisés. « Traditionnellement, on mesure l'efficacité d'un système de transport en utilisant des variables familières à l'ingénieur de trafic, telles que temps par déplacement, vitesses moyennes, ou temps total passé par la population en transport. L'idée implicite dans une telle approche est que le service rendu aux usagers par un réseau se mesure au gain global de temps de transport (ou coût généralisé) qu'il procure. [...] Or, ce postulat est faux. Il est facile de trouver des cas où le service rendu augmente, bien que le temps global de transport se soit accru ». L'auteur souligne ainsi l'insuffisance de la notion de coût généralisé de déplacement couramment utilisée pour caractériser le point de vue de l'utilisateur. Cette insuffisance est expliquée par le fait que cette notion n'intègre en réalité que les seuls facteurs négatifs (coûts monétaires, temps perdus pondérés par les coefficients d'inconfort). Ne prenant en compte qu'un aspect limité du déplacement, la notion de coût généralisé de déplacement ne peut réellement traduire la satisfaction (ou l'insatisfaction) ressentie par l'utilisateur. Car si se déplacer est ressenti par l'utilisateur comme une contrainte, atteindre sa destination est, en revanche, ressenti par lui comme une satisfaction. Koenig illustre ce phénomène en donnant un exemple. Des études ont mis en évidence les effets de travaux entrepris dans une agglomération pour améliorer la qualité du réseau de transport. L'objectif déclaré étant de réduire les durées et les coûts de transport. Or, ce que l'on a constaté, c'est qu'à la mise en service de ces ouvrages, les temps de transport ne variaient presque pas, mais que les longueurs de déplacements, elles, augmentaient. Ce constat s'explique par le fait que l'utilisateur met à profit toute amélioration d'infrastructure à l'augmentation préférentiellement de la longueur moyenne de ses déplacements plutôt que la réduction de ses temps et ses coûts de transport. Cela traduit le fait que l'utilisateur préfère développer l'univers de ses choix dès que les infrastructures de transport le lui permettent plutôt que de réduire ses temps de déplacements. Koenig en tire la conclusion que tout indicateur de service se doit d'associer étroitement, aux aspects négatifs d'un déplacement, ses aspects positifs.

La théorie de l'accessibilité urbaine de Koenig cherche à « évaluer l'utilité procurée

par la possibilité d'accéder aux différents points d'intérêt de la ville par l'intermédiaire du réseau étudié. Cette utilité est donc celle qu'offre le système global formé par les structures urbaines et le réseau qui le dessert ». On cherche alors à mesurer l'utilité nette d'un déplacement pour un agent économique, la satisfaction retirée d'un déplacement, qui est en fait la différence entre les deux éléments composant le déplacement : un élément moteur, représenté par l'intérêt attaché par le citoyen à la possibilité d'accéder à un lieu de destination donné, et un élément résistant, représenté par le temps, l'argent, l'inconfort qu'il faut « payer » pour se déplacer. L'accessibilité mesure en fait la plus ou moins grande facilité d'accéder en un lieu ou plus précisément à ses attributs. C'est bien la structure urbaine et le système de transport que l'on cherche à considérer en mesurant « la satisfaction que le résident retire de la possibilité qui lui offre une urbanisation desservie par un réseau de voirie et de transport de choisir entre de nombreux lieux d'emplois, de service et de loisirs pour satisfaire ses besoins d'activité, d'échange et de communication. L'étendue de ces choix offerts est en fait un facteur déterminant de la qualité du service rendu » (Poulit, 1994, p.6).

Avant de présenter la théorie économique de l'accessibilité de Koenig, nous allons exposer l'approche intuitive de la mesure de la satisfaction de l'utilisateur de transport donnée par Poulit (1974). Poulit fournit une approche intuitive de la mesure de cette satisfaction en introduisant la notion de l'indice de choix. Il étudie les conditions à remplir si on fait varier à la fois sur une liaison i et j donnée, les conditions d'urbanisation en j (les emplois offerts) et les conditions de transport entre i et j , pour que la satisfaction de l'utilisateur reste constante. Il parvient à la conclusion qu'il suffit pour atteindre ce résultat, qu'à toute progression linéaire du coût de transport soit associée une progression multiplicative des choix offerts à la destination. De façon mathématique, c'est la fonction logarithmique qui permet de faire correspondre à une progression multiplicative, une progression additive. Il propose alors de considérer le logarithme des biens offerts pour exprimer la satisfaction de l'utilisateur. $\log E_j$ caractérise (à un facteur près λ) l'intérêt que l'utilisateur attribue à la possibilité de pouvoir disposer à sa destination d'un marché d'emplois, de services ou de biens égal à E_j . En retirant de ce terme positif, le facteur négatif, c'est-à-dire le coût généralisé de transport (c_{ij}), il définit la satisfaction ressentie par l'utilisateur qui s'écrit, pour une liaison ij donnée :

$$S_{ij} = \lambda \log(E_j e^{-\beta c_{ij}}) \quad (2-43)$$

Cette expression peut être étendue à l'ensemble des liaisons issues de i . Ainsi, les résidents de la zone i , avant d'effectuer leurs déplacements, prennent-ils en compte l'ensemble des destinations potentielles qui leur sont offertes. La satisfaction d'un résident de la zone i vis-à-vis de l'ensemble des biens offerts par l'ensemble des zones j est égale à⁷ :

$$S_i = \lambda \log\left(\sum_{j=1}^n E_j e^{-\beta c_{ij}}\right) \quad (2-44)$$

Selon Poulit, cette formulation du surplus de l'utilisateur, en intégrant cet indice de choix

permet également de dépasser, dans le cadre de l'évaluation des projets d'investissement de transport, le mythe des effets structurants, c'est-à-dire le principe selon lequel l'arrivée d'une infrastructure de transport, dans une région donnée, crée de la richesse. En somme l'amélioration du système de transport peut permettre aux habitants d'une zone enclavée d'atteindre des destinations jusqu'alors inaccessibles, et donc d'élargir l'univers de choix des individus. Dans ce cas, ce n'est pas tant l'amélioration des conditions de déplacements qui importe mais plutôt l'élargissement de l'ensemble des choix offerts aux habitants de la zone considérée. Bien sûr, il ne faut pas exclure que cette « ouverture » peut induire également des effets déséquilibrants. L'effet de désenclavement peut conduire à un mouvement de concentration à terme vers des zones connectées plus développées.

Koenig (1974) reprend cette approche en lui donnant une dimension théorique qui s'inscrit dans la tradition néoclassique du comportement du consommateur. Il propose d'intégrer le concept d'accessibilité dans la mesure de l'utilité de l'utilisateur, et définit la notion d'utilité nette. L'accessibilité est alors une notion positive traduisant l'intérêt que l'utilisateur attribue aux choix que lui offre son environnement spatial (urbain, régional, national) desservi par un réseau de transport. Koenig formalise sa théorie économique de l'accessibilité urbaine à partir de l'exemple de Monsieur Dupont résidant dans la zone i d'une agglomération et à la recherche d'un emploi. On suppose que M. Dupont se comporte comme suit :

1.
Il associe à chacune des possibilités d'emploi qui lui sont offertes un revenu annuel, R . Ce dernier tient compte du revenu réel offert, des chances effectives qu'il a d'être retenu sur cet emploi et, également d'un certain nombre de variables subjectives (convenances personnelles, intérêt qu'il porte à ce travail, avantages sociaux procurés, etc.) ;
2.
De même, à chacun des lieux où une possibilité d'emploi est offerte, M. Dupont associe un coût généralisé annuel du transport, T (temps passé, coût monétaire, inconfort, risque d'accident, etc.) tenant compte des spécificités inhérentes à sa propre situation (possession d'une voiture, niveau de congestion du réseau, qualité des transports en commun, etc.) ;
3.
Pour chacune des offres d'emploi dont il peut avoir connaissance, M. Dupont évalue l'utilité nette, $U=R-T$;
4.
Enfin, il retient l'emploi qui lui procure la plus grande utilité nette. Concrètement, c'est

⁷ Le passage des formules (2-51) à (2-52) peut paraître surprenant. En effet, la dernière expression ne s'obtient pas en réalisant la somme sur j des S_{ij} , mais par la transposition de l'expression de la satisfaction ressentie par l'utilisateur pour une liaison donnée, à celle ressentie par l'utilisateur pour l'ensemble des liaisons issues de i . Pour une liaison ij , c'est le log des emplois à destination pondéré par la fonction de résistance qui est considéré, et pour l'ensemble des liaisons issues de i , il s'agit donc de l'ensemble des emplois offerts en destination (leur somme) pondéré par leurs fonctions de résistance.

l'utilité nette moyenne des résidents de la zone i ayant des caractéristiques socio-économiques voisines de celles de M. Dupont à laquelle on s'intéresse. Il suffit donc de connaître la distribution des revenus équivalents attachés par un de ces résidents aux emplois offerts.

Il suppose ensuite que le revenu équivalent R associé par un individu précis (M. Dupont) à un emploi tiré au hasard suit une variable aléatoire. Intuitivement, il est clair que beaucoup d'emplois n'offrent qu'un revenu équivalent faible ; la loi de probabilité est supposée être exponentielle négative, ce qui signifie que la probabilité de trouver un salaire (ou utilité nette) supérieur à une valeur donnée décroît très rapidement quand cette valeur augmente. La densité de probabilité, $f(x)$, de la variable aléatoire R est alors de la forme suivante :

$$f(x) = \frac{1}{x_0} e^{-x/x_0} \quad (2-45)$$

x_0 est le coefficient caractéristique de l'individu choisi (M. Dupont).

On montre que l'utilité nette offerte à l'individu caractéristique est une variable aléatoire dont la moyenne est⁸ :

$$\bar{U}_i = x_0 \log A_i \quad (2-46)$$

avec

$$A_i = \sum_j E_j e^{-C_{ij}/x_0} \quad (2-47)$$

i est la zone de résidence de l'individu, n est le nombre de zones du périmètre étudié, E_j est le nombre d'emplois de la zone j , C_{ij} est le coût généralisé annuel du transport de la zone i vers la zone j , soit du trajet aller-retour pour se rendre à un travail en j quand on habite en i ⁹. On montre que $1/x_0$ est le coefficient de conductance des modèles gravitaires et que A_i est un indicateur d'accessibilité aux emplois. Il caractérise la liberté de choix offerte au citoyen considéré. Il représente le nombre des destinations possibles compte tenu d'un coefficient d'atténuation $\frac{e^{-C_{ij}/x_0}}{e^{-x_0}}$ fonction du coût de transport : une

destination très proche (C_{ij} nul) compte pour 1, une destination très éloignée (C_{ij} infini)

⁸ On retrouve ici l'approche de Neuberger (1971) qui est un des premiers à avoir établi l'association entre les indicateurs d'accessibilité de Hansen et les mesures du surplus spatialisé du consommateur.

⁹ où k est le coefficient de pénibilité du trajet, τ est la valeur du temps, est temps de transport de la zone i vers la zone j , est le coût monétaire du déplacement de la zone i vers la zone j . On note par ailleurs que la relation avec le temps généralisé est :

pour zéro. A_i peut s'interpréter comme « le nombre d'emplois équivalents ramenés à une distance nulle » offert à M. Dupont. Cette formule (2-46) qui donne finalement l'utilité finalement offerte par la ville et ses transports au citoyen considéré, constitue le résultat fondamental de la théorie de l'accessibilité. Si M. Dupont n'avait qu'un seul emploi à sa disposition ou s'il était contraint d'en prendre un que le « planificateur suprême » lui aurait désigné au hasard entre plusieurs milliers d'emplois possibles, son revenu moyen serait égal à x_o . En fait, il multiplie ce revenu de base par $\log A_i$ puisqu'il peut choisir dans toute l'agglomération celui qui lui permet d'améliorer le plus fortement son utilité nette par rapport à x_o . Le revenu de base, x_o , est nettement plus faible que le revenu moyen (salaire moyen) ; il est en effet la moyenne entre une petite minorité d'emplois qui conviennent effectivement à M. Dupont (comptés alors pour le salaire qui leur est attaché) et une forte majorité d'emplois qui ne lui conviennent pas (comptés alors pratiquement pour zéro, quelque soit leur revenu correspondant). Ce qu'il faut retenir c'est que plus la liberté de choix de M. Dupont augmente, plus il a des chances de trouver un emploi bien rémunéré, intéressant (qui lui convient) et proche de son domicile (qui minimise les coûts liés au déplacement).

La théorie de l'accessibilité permet donc d'explicitier et de justifier mathématiquement l'idée de bon sens implicitement contenue dans les indicateurs A_i . On pourrait la résumer comme suit : plus la ville offre de destinations (proches de préférence) susceptibles de répondre à un besoin donné d'un citoyen, et plus il y a de chances pour que ce citoyen en trouve une qui lui convienne bien. Les indicateurs d'utilité U_i reflètent non seulement les variations du coût de transport, mais aussi les variations de l'intérêt probable de la destination choisie, qui s'accroît lorsque la « liberté de choix » augmente.

232. Accessibilité, surplus de l'usager et théorie de l'utilité aléatoire

Neuberger (1971) est le premier auteur à avoir reconnu l'association entre les indicateurs d'accessibilité de Hansen et la mesure du surplus spatialisé du consommateur. Par la suite, les travaux de Ben Akiva et Lerman (1979) sur l'accessibilité partent du constat que les mesures d'accessibilité ne sont pas suffisamment fondées sur une théorie explicitement comportementale. Ils proposent alors de considérer une mesure de l'accessibilité qui soit cohérente avec l'application des modèles d'utilité aléatoire aux processus individuels de décision. Cette mesure est l'espérance du maximum d'utilité que le consommateur obtient à partir d'une situation donnée. L'accessibilité est envisagée comme étant le résultat d'une action effectuée à partir d'un ensemble d'alternatives de déplacement. Pour formaliser ce concept, on note l'ensemble des alternatives de déplacement C_t , où l'indice t représente l'individu auquel se rapporte l'accessibilité ainsi déterminée. Les attributs de l'ensemble C_t sont par définition mutuellement exclusifs et collectivement exhaustifs, et une et seulement une alternative peut être choisie par t dans son processus de décision unique. On suppose que l'individu t associe une utilité à chaque alternative de l'ensemble C_t , et que les individus choisissent l'alternative de C_t qui maximise leur utilité. Les utilités sont supposées être des variables aléatoires notées $U_t = (U_{it}, \dots, U_{nt})$ où n est le nombre d'alternatives dans C_t . Sous ces hypothèses, Ben-Akiva et Lerman considèrent que l'accessibilité est simplement l'utilité procurée par le choix effectué par l'individu t . L'individu sélectionnant l'alternative qui maximise son utilité,

et étant donné que l'utilité est définie comme une variable aléatoire, il vient alors :

$$Acc_t = E(\underset{i \in C_t}{Max} U_{it}) \quad (2-48)$$

Les auteurs indiquent que, sous un ensemble de restrictions sur la distribution de U_t , la valeur espérée du maximum d'utilité peut être considérée comme une mesure du surplus du consommateur.

La notion d'accessibilité est au coeur de l'interaction entre transport et urbanisation. Certains auteurs, comme Martinez (1995), proposent d'interpréter la notion d'accès comme le lien économique entre le système d'occupation des sols et le système de transport. La notion d'accès, au sens plus large que celui d'accessibilité, est envisagée comme un élément qui révèle une connexion économique entre système de transport et système spatial urbain des localisations. L'analyse développée par Martinez fournit une structure pour la modélisation de l'interaction transport et occupation des sols. L'auteur rappelle que si la définition de l'accès a posé des difficultés à de nombreux auteurs, celles-ci sont justifiées par le fait que l'accès est une notion abstraite appartenant à l'intersection de deux sous-systèmes : le transport et les activités, c'est-à-dire mouvement et espace. La notion physique de l'accès tente d'appréhender la relation qui existe entre la localisation spatiale des activités et les difficultés (distance, coût de transport) qui existent pour s'y rendre à partir d'une localisation donnée. Réciproquement, elle tente d'appréhender les difficultés qu'ont les individus à échanger à partir de n'importe quelle localisation. Les déplacements sont effectués dans l'objectif de « prendre contact » ce qui justifie l'importance de la notion d'accès. L'accès peut alors être défini comme l'avantage économique dérivé de l'interaction entre deux activités, qui est l'avantage net obtenu par la prise de contact avec les autres activités moins le coût d'interaction (le coût de transport). La notion d'accès recouvre deux dimensions. La première renvoie à l'accessibilité. C'est l'avantage obtenu par l'individu qui se déplace vers certaines opportunités. Elle est perçue directement par la personne qui se déplace. La seconde est l'attractivité. Il s'agit de l'avantage obtenu en étant visité par d'autres activités. Puisque ces deux mesures représentent des avantages perçus, elles sont décrites par un vecteur plutôt qu'un scalaire. On suppose que H est le nombre de ménages et de firmes et que l'espace est divisé en Z zones homogènes. Alors :

$$att_i = \{att_{hi} / h \in H, i \in Z\} \quad (2-50)$$

C'est le vecteur d'accessibilité à partir de la zone i pour l'individu h .

$$att_i = \{att_{hi} / h \in H, i \in Z\} \quad (2-50)$$

C'est le vecteur d'attractivité étant donné la localisation de l'individu h en i .

Un déplacement permet d'établir le contact entre au moins deux activités, affectant les deux extrémités de l'interaction. Ainsi, un déplacement génère des avantages (ou

coûts). Ces avantages deviennent un surplus de localisation potentiel des activités (ménages ou firmes) qui est pris en considération lorsque les agents font leur choix de localisation. Cette structure fournit donc un lien économique entre transport et localisation des activités. Martinez (1995) propose à partir de cette approche un modèle interactif de transport et de localisation. Ce modèle sera présenté dans le chapitre suivant.

Les deux notions essentielles qui viennent d'être présentées, l'interaction spatiale et l'accessibilité, se retrouvent dans les différents modèles d'urbanisation.

Section 3. Les modèles de simulation des localisations urbaines

Les modèles de prévisions d'occupation des sols ont été développés afin de fournir des prévisions à 10-20 ans des schémas de développement urbain. De façon générale, ces modèles sont apparus dans les années 60 aux Etats-Unis et, avec quelques années de retard en Europe. Ils ont été conçus avec l'appui d'études de transport de grandes villes américaines (Boston, Chicago, Détroit, Los Angeles, Philadelphie, Pittsburgh, San Francisco, etc.). Le principe fondamental de ces modèles est le principe d'interaction spatiale. L'objectif le plus généralement recherché est de fournir un schéma de référence de l'évolution spontanée des grandes villes et d'étudier des variantes en vue de contribuer à la prise des décisions en matière d'utilisation des sols, de zonage, de tracé des grandes infrastructures de transport, etc. Ce sont généralement des modèles de grande taille comportant un nombre élevé d'équations et opérant sur un grand nombre de zones géographiques élémentaires. Tout ceci explique leur coût important et la part prépondérante des frais de collecte statistique et de traitement informatique par la génération des ordinateurs alors en usage. La lourdeur de ces coûts, jointe aux résultats parfois jugés minces de la plupart de ces grands modèles, ont conduit à des controverses à propos de leur pertinence à partir des années 70. Lee (1972) s'est montré très critique dans une étude intitulée *Requiem for large scale models*. Cependant, la simulation des conséquences des décisions susceptibles d'affecter l'aménagement et le développement d'une ville ou d'une région revêt un grand intérêt pratique. Intégrés aux processus de décisions, comme outils heuristiques, les modèles de simulation jouent un rôle de « métaphores rigoureuses » (Bateson, 1980). « Comme dans les arts et les lettres, le rôle de la métaphore est ici de stimuler l'imagination. La simulation des rapports entre certaines composantes du système fortement intégré qu'est, par exemple, une région métropolitaine, reste un moyen privilégié de connaissance. En particulier, la simulation peut compléter l'intuition et même la remettre en question, en soulevant la possibilité de conséquences contre-intuitives et d'effets pervers » (Villeneuve, Fréchette, 1998).

Selon les auteurs, ces modèles ont des noms différents : *Computer simulation models of urban location* pour Kain (1987), *modèles stratégiques de développement urbain* pour Derycke (1982), *modèles à espace discret* pour Camagni (1996). Diverses typologies de ces modèles ont été proposées. On retrouve ainsi, les modèles de programmation linéaire, les macro-modèles de transport et d'utilisation des sols, les modèles économétriques. Nous ne prétendons pas faire une présentation exhaustive de ces modèles, mais présenter ceux qui ont retenu le plus l'attention. On peut considérer que deux traditions existent en matière de modélisation urbaine. La première remonte à

Lowry (1964). Celui-ci fut le premier à tenter de reconstituer à l'aide d'algorithmes programmés sur ordinateur la logique de la répartition des activités au sein de l'espace urbain. Malgré la simplicité de son fonctionnement et son caractère statique, la structure du modèle initial est relativement ambitieuse car elle tente de capter, à un niveau poussé de désagrégation géographique, l'interaction bidirectionnelle entre l'emploi et la population (Villeneuve, Fréchette, 1998). La deuxième tradition remonte à Forrester (1969). Plus abstraite, elle est intrinsèquement dynamique et tente d'explorer à long terme l'évolution d'une ville considérée comme un système complexe. Enfin, on peut considérer une troisième ligne de modèle, à savoir les modèles de programmation linéaire et économétrique.

31. Les modèles généraux de transport et d'utilisation du sol : le modèle de Lowry

Cette famille de modèle a connu un grand succès pendant les années 60 et est fondée sur le principe de l'interaction spatiale et la dualité entre les décisions de localisation et la demande de transport. Elle intègre en un seul macro-modèle urbain les composantes des différentes décisions de localisations : résidentielles et productives, industrielles et de services, sur la base de leurs interactions complexes. Le premier modèle de cette famille a été proposé en 1964 par Lowry. Cet auteur décrit lui-même l'objet de son modèle dans les termes suivants :

1.
le modèle a été construit afin d'évaluer les impacts des décisions publiques (concernant le développement urbain, les taxes, les contrôles de l'occupation des sols, les investissements de transport) sur la forme métropolitaine ;
2.
le modèle a également pour objet de prévoir les changements des formes métropolitaines au cours du temps, qui sont la conséquence de changements actuellement visibles ou anticipés dans des variables clés telles que la structure des emplois basiques, l'efficacité du système de transport, ou la croissance de la population.

311. Structure globale et fondement théorique

Le modèle de Lowry tend à simuler la structure des usages du sol à un moment donné sur la base d'un ensemble limité d'information : la nature et la localisation des activités industrielles en ville et la matrice des distances ou des temps de transport entre les zones de la ville. Ce modèle estime d'une part, la taille de la population urbaine totale et sa localisation dans les m zones dont la ville se compose, d'autre part, le volume de l'emploi des services rendus à la population et sa localisation dans les mêmes zones, et enfin, le schéma des déplacements domicile-travail et domicile-commerce (ou encore les déplacements pour l'achat des services) et donc la demande globale de transport en ville.

La logique interne du modèle consiste en une fusion organique de deux hypothèses théoriques :

1.

Lowry emprunte à la théorie de la base économique la dichotomie entre le secteur basique et le secteur non basique. La logique de la base économique urbaine permet d'estimer deux variables liées à la base économique (les emplois basiques), la population résidente et l'emploi dans le secteur des services.

2.

Lowry utilise le principe d'interaction spatiale sous forme de deux modèles de potentiel gravitationnel à contrainte unique, d'une part pour loger la population autour des lieux de travail (modèle résidentiel) et d'autre part, l'emploi de service autour des résidences et des lieux de travail (modèle de localisation des services). L'hypothèse sous-jacente à la logique de localisation dans le modèle consiste à supposer que le choix de l'habitat résidentiel est guidé par les seules considérations d'accessibilité aux lieux de travail (sans même considérer l'élément du coût du sol) et que le choix de localisation des services est guidé, de manière plus acceptable cette fois, par des considérations d'accessibilité de la clientèle potentielle. La structure logique du modèle peut donc être résumée comme la combinaison du modèle standard de la base économique urbaine à deux modèles d'interaction spatiale qui répartissent l'emploi de service et la population dans toutes les zones de la ville.

L'emploi global (L^T) est fourni par la somme de l'emploi de base, industriel, et de l'emploi de service ($L^B + L^S$) ; il engendre, à travers le taux d'activité ($1/a$), la dimension de la population qui génère à son tour, à travers une série de coefficients d'emploi de service par résident (a^k), l'emploi de k secteurs d'activité de service. La distribution territoriale de cette dernière variable est déterminée en fonction des localisations résidentielles mais également en partie en fonction de la localisation de l'emploi total, du fait que l'on suppose que pour utiliser ces services (commerce de détail, guichets de banque, bibliothèques) des déplacements ont lieu également depuis les lieux de travail et pas seulement depuis les lieux de résidence.

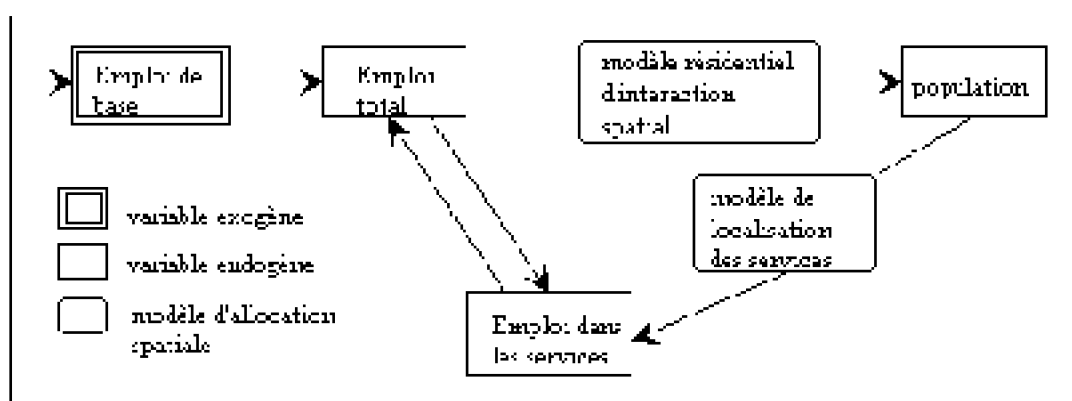


Figure 2- - Logique interne du modèle de Lowry

Source : Camagni (1996).

312. Structure mathématique du modèle

Le modèle comprend dans sa formulation originelle neuf équations simultanées et trois inéquations de contraintes.

3121. L'utilisation du sol

La surface disponible totale dans chaque aire élémentaire j ($j : 1$ à n) se décompose de la manière suivante :

$$S_j = S_j^B + S_j^V + S_j^S + S_j^R \quad (2-51)$$

avec

S_j : surface totale de la zone j ,

S_j^B : surface de la zone j occupée par les emplois basiques,

S_j^V : surface de la zone j non urbanisable,

S_j^S : surface de la zone j occupée par le secteur de détail,

S_j^R : surface de la zone j occupée par le logement des ménages.

A chaque itération du modèle, le total des aires disponibles pour les usages résidentiels est calculé, en enlevant à la surface globale les zones inutilisables, les zones consacrées aux activités de base, toutes deux données de façon exogène, et les zones attribuées de façon endogène par le modèle aux activités de service.

3122. Détermination de la population et localisation des ménages

Le niveau de la population résidente totale dépend du total des emplois dans l'aire urbaine :

$$P = g \cdot \sum_{j=1}^n E_j \quad (2-52)$$

avec g , l'inverse du taux d'activité, et E_j , l'emploi total dans la zone j .

Ensuite, la population est répartie dans les différentes zones en fonction du nombre total d'emploi et d'une fonction de résistance aux déplacements domicile-travail appliquée aux différentes localisations des lieux de travail. La distribution de la population se fait donc selon un modèle d'interaction spatiale :

$$P_j = \alpha \cdot \sum_{i=1}^n E_i \cdot f_{res}(c_{ij}) \quad (2-53)$$

P_j , la population de la zone j ,

α , un facteur d'échelle assurant l'égalité :

$$P = \sum_{j=1}^n P_j$$

$$\alpha = \frac{P}{\sum_i \sum_j E_i \cdot f_{res}(c_{ij})}$$

Ainsi la population de chaque zone est une fonction de l'accessibilité de cette zone aux opportunités d'emplois (c'est-à-dire dépend de l'accessibilité à toutes les autres zones en termes d'emploi). En outre, les estimations de P_j doivent vérifier une contrainte de densité :

$$P_j < Z_j^R \cdot S_j^R \quad (2-54)$$

Cette inégalité garantit que les résidents dans une certaine zone ne dépasseront pas une contrainte urbaine de densité résidentielle maximum.

3123. Détermination du niveau d'emploi du secteur de détail et localisation des activités

Le volume d'emploi basique, leur localisation et la surface occupée par ces activités sont donnés de façon exogène. Le volume de l'emploi du secteur de détail de type k est défini en termes de coefficient d'activité par personne résidente :

$$E^{Sk} = a_k \cdot P \quad (2-55)$$

a_k , une constante

k , le type d'activité du secteur de détail.

Cet emploi est localisé dans l'espace urbain autour des localisations résidentielles. Dans son modèle originel, Lowry décompose la répartition de l'emploi de détail sur une zone j en deux éléments :

1. une part proportionnelle à la population de chaque zone mais pondérée par l'accessibilité plus ou moins aisée à la zone considérée (modèle d'interaction spatiale) ;
- 2.

une part induite par l'emploi total local et correspond aux achats courants de la population sur place.

$$E_j^{Sk} = b^k [c^k \cdot \sum_{i=1}^n P_i \cdot f_k(c_{ij}) + d^k E_j] \quad (2-56)$$

c^k et d^k sont des facteurs qui représentent les poids relatifs des achats effectués à partir du domicile et à partir du lieu de travail respectivement. Ils mesurent le potentiel d'attractivité de la zone j dans laquelle P_i est la population résidente des autres quartiers i . Avec cette structure, les emplois non basiques sont supposés relativement mobiles et se localisent par rapport aux zones où les résidents se sont localisés. Le principal facteur déterminant les localisations est la mesure de l'accessibilité des résidents à ces emplois. b^k est un facteur d'échelle qui assure l'égalité suivante : $E^{Sk} = \sum_j E_j^{Sk}$

Les E_j^{Sk} doivent vérifier les contraintes suivantes :

$$E_j^{Sk} > Z^{Sk} \quad (2-57)$$

Cette contrainte exprime le fait qu'en deçà d'une certaine taille les activités du secteur de détail ne peuvent pas apparaître (c'est le seuil minimum à partir duquel un commerce peut exister).

La consommation du sol par le secteur de détail peut être calculée ainsi :

$$S_j^S = \sum_k e^k \cdot E_j^{Sk} \quad (2-58)$$

Une troisième contrainte intervient :

$$S_j^S \leq S_j - S_j^V - S_j^B \quad (2-59)$$

Cette contrainte exprime les limites de terrain disponible pour le secteur de détail.

3124. L'emploi total

Enfin, l'emploi total peut être déterminé de la façon suivante :

$$E_j = E_j^B + \sum_k E_j^{Sk} \quad (2-60)$$

Plusieurs itérations sont nécessaires pour arriver à un état d'équilibre qui se caractérise par la stabilité des populations et des activités résidentielles.

313. Les limites et les perfectionnements du modèle de Lowry

Le modèle de Lowry présente l'avantage de la simplicité et a été de nombreuses fois employé. Cependant, du moins dans sa version originelle, il présente certaines limites qui ont parfois conduit à une reformulation du modèle.

3131. La faiblesse de la spécification des modèles d'interaction spatiale

Les deux modèles d'interaction spatiale utilisés par Lowry sont insuffisamment spécifiés. Le modèle de localisation résidentielle ne satisfait pas à la contrainte de destination c'est-à-dire qu'elle ne garantit pas que la somme de ceux qui se déplacent à partir des différentes zones i pour travailler en j sont égales au nombre de postes de travail existant en j . Elle ne satisfait en effet qu'une contrainte générale de l'emploi global de la ville. Le modèle de localisation des activités de services est pareillement limité. Wilson propose de retranscrire ce modèle en appliquant la méthode de maximisation de l'entropie. Il spécifie chacun des modèles de localisation comme des modèles entropiques à contrainte unique. Par ailleurs, Garin (1966) a proposé une version matricielle du modèle de Lowry qui présente une plus grande rigueur mathématique.

3132. La faiblesse des fondements théoriques

Le modèle de Lowry a des fondements théoriques assez faibles du point de vue des mécanismes comportementaux. Ce modèle pêche également par le déterminisme étroit qui concourt à la localisation des activités et des ménages, et à la production des trafics qui en résulte. En outre, l'emprunt de la séparation des emplois à la théorie de la base constitue une faiblesse du modèle. Comme l'a montré Massey (1973), il y a dans celui-ci confusion entre deux définitions du basique : soit le basique comprend les activités qui exportent hors de la région urbaine, soit il comprend les activités dont la localisation à l'intérieur du périmètre urbain n'est pas fonction de la localisation de la population de l'agglomération vue comme marché local.

3133. Le caractère statique du modèle

Le modèle de Lowry correspond à une vision instantanée de la ville : les emplois basiques sont figés, dans leur consistance comme dans leur localisation, de même que les surfaces à leur réserver ou les superficies vacantes ou inutilisables. Le schéma des localisations conjointes des emplois non basiques et des ménages est calqué sur l'information contenue dans la matrice origine-destination des flux de transport à un moment donné. Le modèle est donc entièrement statique, il n'examine pas les processus de constitution industrielle, la production du logement ou celle des équipements collectifs. Certes, Lowry fait remarquer que la procédure itérative de résolution du modèle peut s'interpréter comme reconstituant les étapes successives du développement urbain.

Le modèle TOMM (*Time-Oriented Metropolitan Model*) de Crecine (1968) dynamise et complète l'étude de Lowry grâce aux modifications suivantes :

1.

L'inertie des structures urbaines passées est prise en compte : une fraction seulement des ménages est autorisée à se délocaliser en fonction de la carte des accessibilités,

de même qu'une fraction du sol peut changer d'affectation. En conséquence, le modèle requiert des estimations annuelles et travaille sur des variations différentielles.

2.

Le modèle est davantage désagrégré spatialement : les zones élémentaires d'étude correspondent à des îlots du recensement. Plusieurs groupes de ménages sont distingués. Les actifs sont séparés en ouvriers et employés.

3.

Le comportement de localisation des ménages est aussi moins fruste : au lieu de se fonder exclusivement sur une logique d'accessibilité, il intègre également, sur chaque îlot, des considérations relatives au zonage, aux contraintes de densité, à la desserte de quartier en écoles et en services publics, enfin à une certaine tendance à l'homogénéisation du quartier par couches sociales. Au total, la localisation des ménages sur chaque îlot dépend désormais d'une dizaine de variables.

4.

Enfin, les formes fonctionnelles retenues pour implémenter les itérations entre quartiers sont plus diversifiées, et particulièrement non seulement par activité k mais aussi par classes de ménages.

En termes de résultats, « il semble que le modèle TOMM a perdu en précision ce qu'il a gagné en réalisme. Fort consommateur de données statistiques, il n'a jamais pu être calibré avec succès » (Derycke, 1982).

3134. Les nombreuses extensions du modèle de Lowry

Crecine (1968) a été le premier d'une liste importante de chercheurs à tenté d'utiliser la structure de Lowry comme le cœur d'un modèle de prévision opérationnel. Par la suite, Goldner (1968) a construit le modèle PLUM (*Projective Land Use Model*) qui est certainement l'application la plus documentée de la structure de Lowry à un modèle de prévision de l'usage des sols opérationnels (Kain, 1987). Alors que la structure de PLUM reste fidèle à la formulation originelle de Lowry, Goldner a réalisé des modifications et des améliorations significatives, introduisant des changements de programmation, pour s'accommoder des zones de taille différente (Lowry utilise une grille de un mile de côté), il introduit également le temps de déplacement à la place de la distance à vol d'oiseau, et l'usage d'autres types de contraintes.

Webber (1984) a procédé à une évaluation détaillée de ses différentes versions, en fonction de sa capacité à décrire, à expliquer et à prédire la répartition des personnes et des activités aux échelles urbaine et régionale. Ses conclusions sont claires. Sur le plan descriptif, le modèle peut reproduire assez bien l'organisation spatiale des activités urbaines. Cependant, Webber montre que la capacité descriptive du modèle a été améliorée, dans les versions les plus récentes, aux dépens de sa capacité prédictive, et par là, de son utilité pour l'aménagement et la planification. Cette divergence entre la capacité descriptive et la capacité prédictive du modèle relève essentiellement de la question de l'agrégation : en général, la qualité des prévisions augmente avec le niveau d'agrégation, tandis que les descriptions sont meilleures, c'est-à-dire plus intéressantes, à

des niveaux de désagrégation plus poussée.

Enfin, la logique du modèle de Lowry a inspiré plusieurs modèles d'interaction de transport et localisation, dont le modèle de Putman (ITLUP, 1973, 1974 ; DRAM, 1983), le modèle de Mackett (LILT, 1983) et enfin celui de Anas (1984) (Cf. Chapitre 3).

32. Les modèles de programmation linéaire et les modèles économétriques

Les modèles de programmation linéaire et les modèles économétriques s'inspirent de la théorie néoclassique de l'équilibre spatial des agents économiques. Ils ont une visée opérationnelle dans la mesure où ils sont construits en vue d'une application empirique.

321. Les modèles de programmation linéaire

En 1960, deux chercheurs de l'Université de Pennsylvanie, Herbert et Stevens, travaillant sous la direction de Harris, entreprennent à l'aide de moyens financiers importants une vaste étude de transport dans la région de Philadelphie. Le modèle qu'ils élaborent se proposait de déterminer une utilisation optimale de l'espace pour la localisation des activités urbaines de l'emploi industriel, de la population et des résidences, de l'emploi lié à la population résidentielle, des transports, et des autres emplois. En fait, seul le schéma de localisation résidentielle a été approfondi, au moyen d'un modèle micro-économique de comportement des ménages qui a pris la forme d'un programme linéaire. Ce modèle est basé sur le concept d'offre de rente (*bid-rent*) développé par Alonso. En raison de cette ascendance théorique commune, le modèle H-S (Herbert-Stevens) constitue un modèle discret, parallèle au modèle standard d'utilisation du sol de la NEU¹⁰ (présenté dans la section suivante). A défaut de l'élégance théorique des modèles continus, il présente l'opérationalité potentielle qui leur manque (Camagni, 1996). Ce modèle simule un marché compétitif pour l'allocation de terrains à usage résidentiel entre les habitants d'une ville, sur la base d'une offre différentielle de rente aux propriétaires : comme sur tous les marchés, le terrain revient à celui qui offre la rente la plus élevée. Le niveau de la rente offerte par chaque habitant pour chaque terrain procède d'une comparaison entre le budget disponible pour l'achat du service résidentiel global et le coût de ce service (à l'exclusion du prix du terrain). Le terme de service résidentiel global recouvre la combinaison spécifique d'un logement, d'un certain niveau de qualité de l'environnement, d'un ensemble de déplacement et une certaine surface de sol. Le modèle optimise la localisation de groupes différents de population, repérés par homogénéité de revenu par tête, de préférences de localisation, etc. Suivant les contraintes qui découlent de la dimension des zones disponibles et de la nécessité de loger toute la population sur le territoire de la ville, le modèle se propose de déterminer le nombre de personnes du groupe h qui acquiert le service résidentiel k en zone i , la rente unitaire effective en zone i , et la subvention ou la taxe pour chaque personne du groupe h . Chaque personne choisit sa résidence non pas sur la base de toutes les alternatives possibles correspondant aux courbes d'indifférence, mais seulement à partir des alternatives qui garantissent la différence maximale entre le budget résidentiel et les coûts, et ceci sous des contraintes qui respectivement garantissent que la demande de sol soit compatible avec sa

¹⁰ Nouvelle Economie Urbaine.

disponibilité dans chaque zone et que toute la population présente trouve une localisation résidentielle. Ce processus maximise le surplus payable comme rente : si nous supposons la gratuité de la terre, sans aucune rente à payer, cette différence représente en réalité l'avantage subjectif maximum qu'une personne retirerait de la localisation. C'est un critère d'optimisation en accord avec la méthode proposée et sa théorie sous-jacente : il permet de simplifier au maximum le problème des choix individuels. Le problème peut également être posé de la façon suivante : comment minimiser la rente effective de l'ensemble du système territorial, subvention à la population comprise, en tenant compte du fait que la rente payée par chaque groupe social soit au moins égale ou supérieure à son avantage subjectif c'est-à-dire son offre de rente. D'emblée, il pourrait sembler étrange que le problème dual impose la minimisation de la rente effective, mais ce résultat découle de l'action d'un mécanisme concurrentiel de marché. Dans le cas primal, on se place du point de vue du propriétaire qui attribue le terrain à quiconque est à même d'en offrir le prix le plus élevé, dans le cas dual, du point de vue de l'acquéreur, qui essaie de minimiser sa dépense en mettant aux prises les différents propriétaires.

L'intérêt de la variable de subvention permet d'éviter que certains groupes sociaux à revenu faible ne soient chassés de la ville par la capacité de paiement plus élevée des autres groupes qui détermine le niveau de la rente effective. Les subventions permettent aux catégories sociales les plus défavorisées de conserver un logement. Cette variable est liée aux politiques publiques sociales et résidentielles. L'utilisation du modèle permet d'évaluer les effets des politiques de subventions de type direct (c'est-à-dire opérant par des transferts de revenu au profit des groupes les moins favorisés engendrant dans la logique du modèle leur déplacement vers des catégories sociales et de revenu plus élevées) et de les comparer à ceux des subventions de type indirect, par exemple les politiques du logement en faveur de l'habitat résidentiel.

Ce modèle présente certaines limites. Il s'agit d'un modèle à visée opérationnelle, cependant la grande masse des informations nécessaires s'est souvent opposée à son utilisation effective. Or, on ne peut pas tirer de solutions théoriques avant d'avoir rendu le modèle opérationnel, en outre, le schéma d'utilisation du sol peut être très différent du schéma réel. Bien que le modèle ait été construit pour un usage opérationnel d'études de prévision d'occupation des sols, il a tout de même influencé des recherches à la fois théoriques et empiriques en économie urbaine. En particulier, l'algorithme de Harris a été utilisé dans le modèle de simulation urbaine NBER et les modèles de développement urbain de Haward (HUDS).

322. Les modèles économétriques de localisation urbaine

Les modèles économétriques ont comme objectif de déterminer quels sont les éléments susceptibles d'expliquer les choix de localisation. Contrairement aux modèles standards pour lesquels l'accessibilité est le critère essentiel, masquant des hétérogénéités spatiales et des spécificités de chaque portion du territoire, cette approche tente de prendre en compte l'ensemble des facteurs de localisations : les spécificités spatiales, la présence de biens publics, les effets de synergie ou d'idiosyncrasie entre différentes activités (classes sociales différentes, différents usages du sol). C'est ainsi que s'est développée une approche alternative aux modèles standards de micro-économie basée sur l'analyse

économétrique des déterminants des choix de localisation.

Cette approche présente plusieurs avantages. Elle permet de déterminer la localisation urbaine des activités industrielles, généralement conçues comme données exogènes dans les modèles Lowry et dérivés, ou estimés avec difficulté dans les modèles d'interaction spatiale. Elle permet également d'estimer l'impact de différents types d'intervention publique ou de facteurs de localisation sur les choix de localisation des entreprises ou des ménages. Enfin, elle se base sur des hypothèses d'optimalité et ne restreint pas la liberté de choix des individus dans le cadre d'hypothèses simplificatrices à rationalité parfaite mais elle essaie d'extraire des relations empiriques fortes pour effectuer des prévisions valables.

L'approche économétrique qui opère en coupes simultanées sur des vecteurs de variable avec autant d'observations que de zones de désaggrégation urbaine, se heurte aux limites suivantes. Premièrement, la limite statistique donnée par l'interaction entre les différentes variables qu'on veut expliquer (colinéarité et autocorrélation spatiale) obligeant à construire des modèles simultanés difficiles à calibrer. Deuxièmement, la limite d'agrégation des informations, par le fait que chaque zone se définit, en termes d'accessibilité par rapport à toutes les autres et non par rapport à chacune en particulier ; en résumé, le modèle n'utilise pas l'ensemble de la matrice des distances entre les zones, mais seulement un vecteur d'accessibilité globale pour chacune d'entre elles.

Il existe deux manières d'utiliser l'approche économétrique ; elles sont tout à fait semblables logiquement, mais elles diffèrent opérationnellement. La première renvoie à la construction des modèles généraux à opposer aux modèles *large scale* d'interaction spatiale, comme le modèle EMPIRIC. La seconde utilisation vise à calculer des équations qui expriment les préférences de localisation de différents secteurs urbains.

3221. Le modèle EMPIRIC

Le modèle EMPIRIC a été développé par Hill en 1965. Il repose largement sur des notions d'accessibilité généralisée. Comme dans le modèle de Lowry, il s'agit de rendre compte de la distribution spatiale des populations et des emplois en fonction de l'attractivité relative de chaque quartier mesurée par son accessibilité. Ce modèle estime la localisation de différentes classes d'habitants et de différents secteurs de production dans une aire urbaine articulée en zones, sur la base de deux types de variables d'explication : des variables instrumentales de politiques publiques, comme la facilité de transport, la présence de biens publics, et des variables neutres, comme la disponibilité du sol ou la présence d'autres activités. Les variables sont, dans la version la plus étendue du modèle, au nombre de onze : deux variables de population active (cols blancs et cols bleus) ; trois variables d'emplois (industries, commerces et entrepôts, activités diverses) ; six variables caractérisant le quartier : la densité d'utilisation des sols, la politique de zonage, le niveau de service de l'alimentation en eau potable, le service de l'évacuation des eaux usées, l'indicateur d'accessibilité du quartier en voiture automobile, l'indicateur d'accessibilité du quartier par les transports en commun.

Les fonctions d'accessibilité sont, classiquement, des fonctions exponentielles inverses des temps de trajet (en voiture automobile ou par les transports en commun,

respectivement). Le modèle ainsi décrit constitue un ensemble d'équations simultanées de forme linéaire (additivité des variables). Ajusté sur les données de la région urbaine de Boston découpée en 29 zones, il a fourni de bons résultats : les R^2 atteignent tous 0,99 pour la période de 1950-1960. Utilisé en projection par période de dix ans de 1970 à l'an 2000, il a également servi, sur des périodes plus courtes, à tester plusieurs variantes, notamment dans le domaine de la politique des transport et du zonage. Bien que le modèle perde progressivement de sa précision lorsqu'on élève le nombre des zones, on l'a finalement utilisé à un niveau relativement désagrégié (600 zones et 10 activités différentes) pour analyser les conséquences de politiques alternatives de transport et de zonage.

Ce modèle a comme principal défaut de reposer sur une base théorique très mince, mais son caractère opérationnel n'est pas négligeable.

3222. Le modèle de simulation urbaine du National Bureau of Economic Research : 1970-1976 (NBER).

Considéré comme la tentative la plus ambitieuse de modélisation de la croissance urbaine de la décennie écoulée, le modèle de simulation urbaine du NBER a été conçu principalement par Kain et Ingram et appliqué d'abord à la ville de Detroit en 1970-1972 avant d'être calibré à Pittsburg et à Chicago à partir de 1975. Fortement enraciné dans la théorie néoclassique de l'équilibre spatial des agents, il s'assigne, outre une meilleure compréhension analytique des problèmes de la croissance et du déclin des villes, des objectifs de politique urbaine, liés notamment au phénomène, typiquement nord-américain, d'abandon des logements vétustes et aux effets du système fédéral d'aide au logement.

a. Caractéristiques du modèle

Bien que très comparable à la plupart des autres grands modèles nord-américains, le modèle NBER s'en démarque par des hypothèses plus réalistes.

1.
L'hypothèse de monocentricité des emplois est abandonnée au profit d'emplois multiples qui conditionnent étroitement les choix résidentiels.
2.
Le modèle tient compte des irréversibilités introduites par le stock de capital : à l'approche d'équilibre de long terme, se substitue des déséquilibres transitoires dus à la durabilité du capital et aux désajustements du stock de logements. Ceci modifie les conditions de l'offre résidentielle, le marché du logement pouvant être momentanément en déséquilibre.
3.
Le modèle intègre les externalités dues à l'environnement et les variables raciales.
4.
Bien que le modèle entende simuler les changements majeurs qui affectent l'espace

urbain du point de vue des emplois, des transports, des résidences et des décisions des principaux agents économiques (entreprises, ménages, producteurs du cadre bâti), il se focalise principalement sur le marché du logement et sur le comportement des différents acteurs sur ce marché. Plus précisément, le modèle présente un secteur de la demande, un secteur de l'offre et un marché qui équilibre - ou n'équilibre pas - les offres et les demandes. Sur ce dernier point, le modèle NBER apparaît supérieur à ses devanciers en ce qu'il prétend fonder sa démarche sur les comportements effectifs des ménages là où la plupart des modèles reposent sur une logique assez pauvre d'accessibilité généralisée. Le modèle de la demande comporte huit sous-modèles successifs. Un sous-modèle de l'emploi basique qui fournit de manière exogène les changements intervenus dans 11 types d'activités différentes et dans 19 zones d'emplois. Un sous-modèle des emplois locaux (emplois desservant les besoins de la population dans la terminologie du modèle). Il relie les variations des emplois locaux aux variations des revenus, de la population résidente et de l'emploi basique de chaque zone. Les changements qui interviennent dans l'emploi local et dans l'emploi basique selon les indications de ces deux premiers sous-modèles, procurent une estimation de la croissance totale des emplois désagrégés par zone, par activité et par statut d'occupation. Un sous-modèle démographie qui simule le cycle de vie de chaque groupe de ménage et fournit en particulier l'âge du chef de ménage, la taille du ménage (grâce à des matrices de probabilité de transition) et son revenu moyen. Un sous-modèle changements d'emplois qui simule le comportement d'offre de travail des travailleurs primaires et tient compte des créations d'emplois nouveaux et de la structure de la population active (taux de participation, taux de chômage, etc.). Un sous-modèle changement de domicile qui analyse la mobilité résidentielle comme le résultat des sous-modèles précédents, c'est-à-dire comme l'effet des changements survenus dans le cycle de vie des ménages et dans le mouvement des emplois. Un sous-modèle des nouveaux ménages qui est entièrement exogène. Un sous-modèle de demande de logements qui est la somme des variations nettes de la mobilité résidentielle et de la demande des ménages additionnels. C'est ici que le modèle est le plus désagrégé. Comme les simulations portent sur dix à quinze ans, le besoin en logements neufs est élevé. Le sous-modèle ventile cette demande en 50 catégories d'ensembles résidentiels (croisement de dix caractéristiques structurelles du logement avec cinq critères de qualité du voisinage). On reconnaît là l'influence du modèle de localisation résidentielle d'Herbert et Stevens dans la mesure où les caractéristiques des ensembles résidentiels tiennent compte des goûts exprimés par les ménages. On tient compte aussi du prix du logement, du coût généralisé de déplacement et de la plus ou moins bonne accessibilité de la zone de résidence par rapport aux lieux d'emplois. Enfin, un sous-modèle statut d'occupation du logement (à titre de propriétaire ou de locataire) qui intervient après que chaque ensemble résidentiel ait été assigné à chaque ménage demandeur, conformément à leurs caractéristiques respectives.

Le secteur de l'offre est décomposé en six sous-modèles. Un sous-modèle *utilisation des sols* qui tient à jour l'emprise au sol des activités industrielles et résidentielles existantes. Un sous-modèle des *anticipations* qui simule l'évolution future des rentes foncières et de la qualité de l'environnement de l'habitat, par extrapolation de la tendance constatée sur

les quatre dernières années. Un sous-modèle de l'offre de *constructions neuves* qui fait dépendre ces dernières du niveau de profit attendu dans chaque catégorie de logements dans les différentes zones résidentielles. Un sous-modèle des *conversions* qui établit une comparaison permanente entre la valeur nette présente des rentes foncières, diminuée des coûts de maintenance et les coûts de conversion (démolition, indemnités d'éviction, reconstruction) qu'impliquerait un changement dans la destination des sols. Si la conversion envisagée devient rentable, il y a addition à l'offre de constructions neuves, dans la mesure où la demande correspondante l'exige. Un sous-modèle de *l'offre des services immobiliers* qui complète l'analyse en précisant le niveau et la structure des services immobiliers annexes rendus par chaque type d'habitat. Enfin, un sous-modèle des *améliorations en capital* qui permet de calculer compte tenu des indications du marché, les taux d'investissement et de désinvestissement pour chaque catégorie de logement.

Le marché joue un rôle médiateur entre la demande et l'offre. Il met en présence la demande des ménages en quête d'un logement et l'offre totale issue des constructions neuves et des conversions décidées. Techniquement, il s'agit de résoudre un programme linéaire pour chacun des 50 compartiments du marché du logement, minimisant les coûts généralisés de déplacement vers chacun des lieux d'emplois. A côté du sous-modèle principal, existent deux sous-modèles connexes précisant, l'un la structure des rentes foncières, l'autre le prix des services immobiliers annexes. Ils influencent l'un et l'autre le choix du statut d'occupation du logement (à titre de propriétaire ou de locataire) et conditionnent la formation des anticipations sur les prix fonciers et l'offre de constructions neuves.

L'une des caractéristiques originales du modèle NBER est d'admettre la possibilité de déséquilibres transitoires correspondant à des situations de rationnement ou, au contraire, d'excédent de la demande. Comme l'écrit Mohan (1979) : « le modèle n'impose pas l'équilibre de chaque sous-marché à chaque période. Chaque compartiment du marché du logement peut présenter une offre excédentaire (logements vacants) ou une demande excédentaire, lesquelles, à leur tour, affecteront les prix de la période suivante. Le modèle procure des prix anticipés du logement pour chaque catégorie, chaque zone et chaque période d'étude. Ces prix influencent le comportement des ménages en quête d'un logement comme les décisions des firmes qui les construisent. La modélisation explicite de l'offre est un élément rarement rencontré ailleurs. Les versions les plus récentes modélisent également les opérations liées au marché du travail, notamment les comportements de recherche d'un emploi, ce qui constitue une autre innovation dans les modèles urbains ».

b. Appréciation du modèle du NBER

L'élaboration du modèle du NBER a bénéficié d'appuis financiers importants et du concours des meilleurs spécialistes de la modélisation. Il est le seul parmi les grands modèles américains à intégrer l'analyse de l'offre des logements et à reconnaître l'importance des phénomènes d'hysteresis et de déséquilibres dans l'étude des structures urbaines. Par rapport à l'empirisme qui a caractérisé les tentatives de la Rand Corporation, les fondements théoriques du modèle du NBER qui admet la diversité des

goûts et des comportements des ménages en quête d'un logement, apparaissent beaucoup plus solides. Mohan (1979) qualifie le modèle du NBER « d'entreprise louable et ambitieuse pour intégrer les réalités de la ville dans le cadre théorique de l'économie urbaine en vue de produire un modèle des structures de la cité ». Cependant, Kain souligne « qu'une analyse plus complète des résultats, des simulations en plus grand nombre, des améliorations dans le calibrage du modèle et de nouvelles recherches sont nécessaires avant d'en faire un instrument définitivement fiable pour l'analyse et la politique urbaines ». Aussi bien les résultats de l'application du modèle ont-ils été plutôt décevants : sous-estimation grave du trend des valeurs foncières, conclusions assez banales en matière d'effets des aides fédérales au logement (risques de dépression du marché foncier, importance des effets de voisinage liés à la composition raciale du quartier, etc.).

Enfin, un autre type de modèle de simulation urbaine peut être présenté. Celui-ci se fonde sur des principes très différents des deux premiers, à savoir la dynamique des systèmes.

33. Les modèles de la dynamique des systèmes

L'approche en termes de dynamique des systèmes urbains, proposée par Forrester, est tout-à-fait différente des modèles précédemment exposés. Derycke (1982) résume l'approche de Forrester de la façon suivante. L'inspiration philosophique du modèle est l'évolutionnisme et l'organicisme, dans la mesure où Forrester suppose qu'à l'image des êtres vivants, les villes naissent, se développent et meurent. Les activités qu'elles abritent, en particulier les entreprises qui s'y créent, parcourent une sorte de cycle vital qui les conduit inexorablement de l'état d'entreprises jeunes à celui d'entreprises mûres et d'industries en déclin. D'autre part, la perspective générale de Forrester est stagnationniste et pessimiste : la croissance à long terme des villes est bloquée par tout un ensemble de facteurs que la mise en oeuvre de politiques correctrices ne parvient pas à enrayer et aggrave même le plus souvent. A long terme, le déclin des villes apparaît certain.

331. L'analyse de la « dynamique urbaine »

Ainsi, chez Forrester, l'approche des problèmes urbains est celle de l'analyse de systèmes appliquée à la ville. Un système est séparé de l'extérieur par une frontière fermée. Les composantes qui déterminent le comportement dynamique sont inclus à l'intérieur du système, les autres rejetés à l'extérieur de la frontière. Forrester accorde une grande importance à l'existence de « boucles de rétroaction », cellules fondamentales du système, qui paraissent constituer l'essence même de l'analyse de système. Une boucle est un trajet reliant décision - action - résultat avec retour au point de décision. Le point de décision (valve) contrôle une action (flux) qui est accumulée pour engendrer une situation. L'information sur cette situation est la base sur laquelle l'action est contrôlée. Un système complexe est un système qui se compose d'un grand nombre de boucles, liées les unes aux autres parce que les pressions dépendent des informations en provenance de beaucoup de stocks. La ville constitue un système, une structure repérée par ses trois

caractères de totalité, de transformations et d'autoréglage. La totalité du système est constituée par un ensemble articulé de trois sous-systèmes principaux : les entreprises, les logements, les populations. Les transformations du système sont apportées par les impulsions venues de l'environnement extérieur et les modifications qui s'ensuivent dans les variables du modèle. L'autoréglage du système s'obtient à partir de « boucles de rétroaction ». L'auteur fait l'hypothèse implicite que la ville constitue un système quasi clos, circonscrit par une frontière perméable aux influences de l'environnement extérieur. Cette spécificité conduit ainsi à gommer l'espace et ses spécificités : la ville devient sans épaisseur.

332. Les principales caractéristiques du modèle

Il s'agit d'un modèle de système de variables parmi lesquelles la séparation entre variables exogènes (ou indépendantes) et variables endogènes (dépendantes des précédentes) n'est pas faite *a priori*. Il n'existe donc pas de fonction-objectif à maximiser. C'est un modèle de grande taille, qui comporte environ 400 équations (dont la moitié correspond à une paramétrisation des valeurs des variables) et plus de 300 variables et paramètres. Forrester a d'ailleurs mis au point un langage informatique particulier pour traiter le modèle : le langage Dynamo. C'est un modèle d'évolution à très long terme : les simulations entreprises couvrent une période qui va de 180 à 250 ans. La longueur de la période couverte s'explique par le fait que Forrester admet qu'il s'écoule un long délai, de l'ordre de 10 à 20 ans, entre la mise en oeuvre d'une politique urbaine et la perception de ses effets par les agents économiques, qui y adaptent leurs comportements. Enfin, la technique d'estimation des paramètres du modèle est assez originale. Au lieu de recourir aux techniques économétriques classiques ou à l'estimation *a priori*, Forrester procède à la « consultation d'experts », c'est-à-dire la méthode Delphi : il réunit des économistes, des urbanistes, des responsables municipaux et recueille leur avis sur la représentation graphique la plus vraisemblable pour chacune des relations du modèle. L'avantage de la méthode est de pouvoir disposer « d'estimations » là où les mesures statistiques sont fragmentaires ou inexistantes. L'inconvénient est le risque de subjectivisme et de divergence entre les avis exprimés.

333. Les résultats

Le principal résultat de Forrester est d'affirmer que le fonctionnement du système urbain est contre-intuitif, ce qui découle de la complexité des boucles de rétroaction qui sous-tendent l'étude des mécanismes de la ville. Forrester insiste beaucoup sur cette caractéristique urbaine essentielle. « Il est devenu clair, écrit-il, que les systèmes complexes sont contre-intuitifs. Un système complexe - une société, une ville, une économie ou un gouvernement - se comporte dans de nombreux cas tout à fait à l'opposé des systèmes simples à partir desquels nous tirons notre expérience. Dans un système complexe, la cause d'une difficulté peut se situer très loin dans le temps par rapport aux symptômes, ou bien dans une partie éloignée et totalement différente du système. En fait, les causes sont généralement trouvées, non pas dans des événements antérieurs mais dans la structure et les politiques du système ». Il convient donc de se méfier des solutions intuitivement évidentes et des politiques correctrices à court terme. Et Forrester

dénonce l'inefficacité de certaines politiques guidées par un souci humanitaire à court terme, qui aggravent la situation en longue période : « les programmes de formation professionnelle, les programmes de logements à bas prix et même l'assistance financière, lorsqu'ils sont utilisés isolément sans améliorer le climat économique de la ville, peuvent tomber dans cette catégorie des promesses à court terme suivies à long terme de processus de détérioration ».

Conçu au départ pour une ville américaine de taille moyenne mais dimensionné pour permettre l'étude de la croissance d'une ville millionnaire, le modèle de Forrester n'a guère connu d'applications en vraie grandeur, même si la ville de Boston a souvent servi de référence, implicite ou explicite, aux estimations des « experts ». L'équipe du MIT a entrepris cependant de tester ce modèle sur la ville moyenne de Lowell qui présente certaines similitudes avec la ville stylisée du modèle. A l'exception de ce test, les résultats du modèle de Forrester sont presque exclusivement théoriques et proviennent des simulations entreprises à l'aide du modèle sur 180 à 250 ans.

334. Critiques et dépassements du modèle

Sitôt publié, l'ouvrage de Forrester a suscité une avalanche de commentaires. Des critiques internes peuvent être formulées à propos de l'imperfection du modèle. Plus radicalement, certains auteurs ont adressé des critiques externes quant à la philosophie et la vision de la ville et de la société sur laquelle repose le modèle.

3341. La critique interne : les imperfections du modèle

Le paramétrage des données a suscité certaines réserves. La fixité des coefficients (matrice des emplois, taux « normaux » de flux, etc.) durant 250 ans a été incriminée, de même que le choix des données initiales. Sur ce dernier point, Forrester rétorque que les valeurs initiales ne sont pas importantes étant donné qu'un déséquilibre initial potentiel entre les valeurs primitives sélectionnées est peu à peu éliminé du système au fur et à mesure que de nouvelles valeurs sont calculées pour les variables de niveau et que pour beaucoup de systèmes, les valeurs de l'équation finale sont indépendantes du point de départ.

La validation des estimations des experts pose un certain nombre de problèmes. En particulier, rien ne garantit que l'estimation des experts ne soit pas fondée sur un nombre restreint d'expériences particulières, appuyées sur l'observation de quelques villes données. Mais si l'on élargit l'échantillon des experts pour corriger ce premier risque, un second apparaît vite : lorsqu'on interroge un expert sur une relation bien déterminée rien n'assure que la réponse n'intègre pas déjà certaines rétroactions indirectes. Enfin, rien ne justifie la supériorité de la consultation d'experts sur l'économétrie classique. « Elle est, au mieux, un expédient commode par sa rapidité, au pire une escroquerie intellectuelle de quelques technocrates » (Derycke, 1982).

Certains auteurs ont remis en question la pertinence de la structure du modèle, notamment en raison de l'omission de la dimension spatiale de la ville. En effet, la ville est considérée, chez Forrester, comme un territoire fermé, quasi vierge à l'origine, appelé à se remplir progressivement, jusqu'à complète saturation. Une autre conséquence de la

vision a-spatiale de Forrester est la mauvaise spécification des flux de migration vers, ou en provenance de l'environnement extérieur. En outre, cette indépendance du système urbain fermé nie l'existence des relations économiques interurbaines : l'activité d'une ville et le niveau de cette activité dépendant nécessairement des offres et demandes de biens émanant de l'extérieur. La construction au niveau urbain de tableaux d'échanges interindustriels fournirait probablement une excellente démonstration de ces phénomènes de dépendance (Derycke, 1982).

En conclusion, le modèle de Forrester est certes un modèle d'interdépendance. Ce n'est certainement pas un modèle d'équilibre général des agents dans l'espace en ce qu'il ignore délibérément les rétroactions venues de l'environnement extérieur. Des critiques plus radicales peuvent être adressées quant à la vision globale de la ville et de la société qui sous-tend ce modèle.

3342. La critique externe : une vision contestable de la ville et de la société urbaine.

Le modèle de Forrester propose une image simplifiée de la ville qui n'est pas tout à fait acceptable. Derycke (1982) souligne trois faiblesses majeures : le faible contenu économique du modèle, les omissions majeures dans la représentation de la ville, la caricature des rapports sociaux.

a. Le faible contenu économique du modèle.

La faiblesse de la représentation de la dimension économique apparaît tout d'abord dans la modélisation des activités des entreprises. Aucune distinction n'est faite entre les branches ou les secteurs d'activité. Ni l'accumulation du capital, ni le progrès technique n'interviennent. La seule logique d'évolution est relative à l'écoulement du temps qui, inexorablement, fait passer l'entreprise par ses trois stades successifs. Il en va de même si l'on analyse l'activité économique des populations. Celles-ci apportent leur force de travail aux entreprises et occupent leur logement. Mais, à part des services publics d'éducation et d'assistance, ces populations n'ont pas d'activités de consommation. Ceci pose le problème de savoir quel critère de bien-être, implicite ou explicite, le modèle cherche à maximiser à travers le temps. On remarque également l'absence des principales grandeurs économiques habituelles : productions, consommations, prix, etc.. Ceci explique les imprécisions et le flou qui enveloppent les problèmes d'estimation du coût des politiques urbaines : le financement de la plupart des programmes est « assuré de l'extérieur », la création d'emplois est obtenue par « transfert vers l'extérieur », les excédents de population sont déversés, sans coût, sur l'environnement, etc.

b. Les omissions majeures dans la représentation de la ville

Le modèle est a-spatial, ce qui conduit à négliger les relations centre-banlieue et les échanges interurbains, et à ignorer des stimuli apportés par les prix et les coûts. Deux omissions majeures doivent être soulignées. La première est l'absence de prix et d'une façon générale d'un marché, la seconde est le manque du rôle des transports. Le modèle de Forrester fait abstraction des prix, il n'est donc pas étonnant que les prix fonciers, et, le

marché foncier, en soient absents. Cependant, le modèle fait intervenir des multiplicateurs des terrains occupés. Ce sont les seuls multiplicateurs du modèle qui correspondent à des fonctions non monotones. Ces multiplicateurs agissent, au-delà d'un certain seuil, comme des facteurs de rationnement et de blocage, donc un peu à la manière d'une exclusion par les prix. Mais ils agissent uniformément pour tous les représentants d'une même classe de la population active. « Aucun économiste n'admettra facilement qu'un rationnement par les quantités entraîne les mêmes effets qu'une hiérarchisation des demandes solvables par un mécanisme de prix. Evacuer le marché et les prix fonciers, c'est faire abstraction des préférences exprimées pour occuper certains quartiers centraux privilégiés et raisonner sur un espace intra-urbain indifférencié » (Derycke, 1982). L'omission du rôle des transports est encore plus surprenante de la part d'un auteur nord-américain. En effet, les dépenses d'équipement des grandes villes américaines en infrastructures de transport, sous la forme d'autoroutes urbaines ou de transports collectifs rapides, ont été bien supérieures au coût des politiques urbaines auxquelles s'intéresse Forrester : dépenses d'assistance et de formation professionnelle, aides publiques à la construction de logements à bon marché ou à la démolition des taudis par exemple. L'esquive du problème crucial des transports est à mettre sur le compte d'une conception a-spatiale de la ville. Il en va de même de l'omission d'autres grands équipements qui structurent l'espace urbain : espaces verts, complexes sportifs et culturels, bâtiments publics, etc.

c. Une vision caricaturale des rapports sociaux souvent dénoncée

Dans le modèle, la mobilité sociale ascendante et descendante est réglée par un subtil jeu de vannes. Le modèle ne permet pas la mixité des couples, la possibilité pour un cadre ou un dirigeant de descendre l'échelle sociale, et affiche un mépris latent pour les marginaux dans la ville.

La faiblesse de la place du transport dans le modèle de Forrester, nous contraint à ne pas retenir ce type de modèle dans notre démarche.

Les modèles décrits ci-avant sont des modèles de simulation, ils visent une application empirique. Leurs soubassements théoriques sont divers, et certains s'appuient sur les hypothèses et les mécanismes de la micro-économie urbaine et spatiale. Dans la section suivante, nous rappelons les grands enseignements théoriques issus de l'analyse néoclassique du fonctionnement de la ville et du comportement des agents économiques dans un milieu urbain.

Section 4. Les enseignements de la micro-économie urbaine

Notre objectif ici n'est pas de présenter une revue exhaustive des modèles de la micro-économie urbaine, ce qui n'offrirait d'ailleurs pas un grand intérêt par rapport à notre démarche, mais d'analyser les principaux résultats qu'offre la micro-économie urbaine dans la compréhension de la relation transport-urbanisation.

41. Le modèle de base de la localisation résidentielle

L'économie urbaine plonge ses racines dans la théorie de la localisation agricole de Von Thünen (1826). Alonso (1964) propose, afin d'analyser les mécanismes d'affectation du sol, une transposition du système de Von Thünen à la localisation résidentielle et à celle des firmes urbaines. L'objectif que se fixe Alonso est le suivant : il s'agit d'expliquer la structure interne des villes, et de comprendre où se localisent les différents agents et pourquoi. Pour ce faire, Alonso met en oeuvre une approche économique dans laquelle il cherche à relier la rente foncière aux utilisations du sol, dans la lignée de Von Thünen. La présentation de son modèle sera ici essentiellement centrée autour de l'analyse de la localisation résidentielle.

411. Les hypothèses

Alonso pose un certain nombre d'hypothèses, dont la connaissance est essentielle pour savoir quels résultats peuvent être dérivés de ce modèle, et pour en connaître la portée d'application. Les hypothèses principales sont relatives à la représentation de l'espace urbain, aux caractéristiques des agents économiques, aux types de déplacements et au marché foncier.

4111. La topographie de la ville

La ville se caractérise par une complète fermeture ce qui permet de se concentrer sur des problèmes spécifiquement urbains (Gannon, 1992). La ville est circulaire et monocentrique. Elle est composée d'un disque central, le CBD (Central Business District) et d'un anneau périphérique qui s'étend tout autour. Le CBD a pour fonction de rassembler l'ensemble des entreprises de la ville, dont les salariés sont tous supposés habiter dans la zone résidentielle. La zone résidentielle, d'autre part, accueille les ménages de la ville, qui envoient quotidiennement chacun un et un seul salarié au CBD et d'autre part, les services de voirie. La ville peut être qualifiée de ville fonctionnelle, dont les zones résidentielles ne sont les lieux d'aucune activité à proprement parler économique, mises à part la construction de routes et de logements, et l'achat de biens de consommation.

La ville est située dans une plaine homogène ; cela signifie que les sols sont libres d'utilisation et ne se distinguent pas entre eux par leurs caractéristiques intrinsèques. Les sols urbains sont supposés de qualité uniforme, sans traits saillants, d'égales aménités, neutres en un mot. Ils fournissent les mêmes quantités de services quelle que soit leur localisation relativement au CBD. Alonso fait au départ l'hypothèse que, conformément à ce qu'on observe dans la majorité des villes, le prix du sol est décroissant avec la distance au centre.

La zone résidentielle au sens d'Alonso est sans histoire, sans mémoire : « elle n'est que le cadre instantané des localisations optimales des ménages, agents rationnels capables de changer de domicile à la moindre variation de leur univers de décision, supposé d'ailleurs certain » (Gannon, 1992). Il n'y a pas de coûts associés à la modification de la localisation résidentielle. Le problème du choix de localisation des agents et des activités dans l'espace résidentiel est réduit au paramètre de décision de la seule distance à vol d'oiseau au CBD.

4112. Les activités et les agents économiques

Les activités de la ville se répartissent, d'une part, entre les entreprises du secteur des biens, concentrées dans le CBD et d'autre part celles du secteur de construction de voirie, qui constitue la seule activité industrielle prenant place dans la zone résidentielle. Pour Alonso, le logement n'existe pas en tant que secteur. Les ménages sont leurs propres promoteurs et constructeurs. En quelque sorte, Alonso suppose une autoconsommation de sol pour chaque résident, considéré ainsi comme un promoteur individuel. Cette hypothèse, très irréaliste, fut abandonnée par la suite par Mills (1967) puis Muth (1969), qui envisagent un secteur du logement à part entière. Les seuls agents économiques de la ville, au sens des consommateurs, sont les ménages. Alonso suppose qu'ils ont mêmes revenu et préférences.

4113. Les déplacements

Les déplacements sont effectués par le salarié de chaque ménage. Leurs trajets aller et retour sont quotidiens et de coût unitaire constant. Le sens des déplacements est le même pour tous les salariés, puisqu'ils sont tous employés au CBD. Alonso considère un seul mode de transport, l'automobile. Il résulte de ces hypothèses restrictives sur le transport que la configuration de la voirie est radio-concentrique : les routes convergent en faisceau vers le CBD en permettant à tout salarié de se rendre à son travail par un trajet en ligne droite (« à vol d'oiseau »). Chaque salarié emprunte, dans la ville d'Alonso, une voie radiale gratuite passant à côté de son domicile, ou du moins suffisamment près pour que l'on considère comme négligeable le coût du trajet l'amenant à la radiale la plus proche. Alonso évacue ainsi les problèmes liés aux difficultés de transport, qui pourtant sont une caractéristique inhérente aux grandes villes contemporaines. Gannon (1992) à ce sujet souligne que la même remarque pourrait être adressée à l'ensemble des précurseurs de la NEU (Nouvelle Economie Urbaine), qui n'ont pour la plupart traité le transport que sous l'angle de la « statique comparative ».

4114. Le marché foncier : un mécanisme d'enchère

Le marché foncier est supposé allouer les surfaces disponibles à chaque usage d'une part, et à chaque ménage d'autre part, par un mécanisme d'enchères au plus offrant. Parler d'usage du sol revient donc à supposer un problème d'allocation des sols entre utilisateurs concurrents à une attribution de surfaces résidentielles à chaque ménage. Les agents qui participent aux enchères foncières de la zone résidentielle sont les ménages et les producteurs de services de voirie. Les ménages disposent d'un profil d'offre de rente continu et décroissant reflétant l'évolution spatiale de la disponibilité en surfaces.

Le marché foncier possède les caractéristiques suivantes :

.
il fonctionne en concurrence pure et parfaite,

.
s'y déroulent en permanence des enchères. Une information parfaite est supposée

donnée à l'ensemble de ses participants, les ménages et les entreprises productrices de services de voirie,

il est complet : chacun de ses acteurs est capable de classer les anneaux dans un ordre correspondant à ses revenus et préférences (pour les ménages) au profit net (pour les entreprises).

La conséquence essentielle de ces hypothèses sur la structure de l'espace est que les différentes localisations ne se distinguent entre elles que par leur distance au centre. En ce sens, on peut dire que la ville présentée par Alonso est unidimensionnelle : le choix de localisation se réduit au problème du choix d'une distance au centre sur un segment de droite (Goffette-Nagot, 1994). On remarque que les hypothèses utilisées par Alonso pour représenter l'espace sont relativement simples. En particulier, la conception d'un espace monocentrique et isotrope permet de ne considérer ni la complexité des localisations définies par rapport à plusieurs points, ni l'existence de caractéristiques propres à chaque lieu. Cette conception permet cependant une première approche féconde des structures et du développement urbain, puisqu'on peut en dériver un certain nombre de résultats en accord avec les observations empiriques les plus marquantes.

Nous allons exposer la formalisation d'Alonso et ses résultats. Nous verrons ensuite comment certaines hypothèses restrictives ont pu être levées, en particulier concernant la prise en compte du système de transport, sans remettre en cause les principaux résultats et le déterminant majeur des localisations résidentielles mis en évidence par Alonso, à savoir un arbitrage entre coût du logement et coût des déplacements domicile-travail.

412. Présentation formelle

4121. Les conditions de l'équilibre du ménage

Dans le modèle d'Alonso et conformément à la théorie néoclassique du consommateur, le ménage qui fait un choix de localisation cherche à maximiser son niveau d'utilité sous contrainte de son revenu et de prix. On considère que les biens que consomme le ménage sont le logement, défini comme une superficie de sol, le transport vers son lieu d'emploi au centre-ville et un bien composite incluant tous les autres biens que le logement et le transport, c'est-à-dire les biens non spatialisés.

On remarque que le ménage est considéré comme le producteur de son logement : sa consommation de sol conditionne directement son niveau d'utilité, sans qu'un quelconque coût de construction soit envisagé. Muth, dans un modèle urbain proche de celui d'Alonso, considère quant à lui un secteur de construction de logement (Muth, 1969).

Le comportement du consommateur se formalise donc de la façon suivante¹¹ :
maximiser

¹¹ Cette présentation est reprise de Goffette-Nagot (1994).

$$U = U(X, S, D) \quad (2-61)$$

sous la contrainte

$$Y \geq p_x X + p(D)S + C(D) \quad (2-62)$$

où X représente le bien composite, de prix unitaire . $U'_X > 0$, il s'agit d'un bien normal.

S est la quantité de sol de prix unitaire p variable en fonction de la distance au centre D , $U'_S > 0$, utilité marginale positive.

$C(D)$ le coût de transport entre domicile et lieu de travail, fonction de la distance au centre D . $U'_D < 0$, toutes choses égales d'ailleurs, son éloignement au CBD se traduit par une désutilité.

Y est le revenu du ménage.

Alonso fait l'hypothèse implicite d'une préférence des ménages pour la centralité (la dérivée marginale de U par rapport à D est négative : $U'_D < 0$ alors que X et S étant des biens normaux, $U'_X > 0$ et $U'_S > 0$). Alonso explicite peu le contenu de cette hypothèse. Il fait allusion à la fois au centre comme lieu d'achats, de loisirs et d'emplois et aux désagréments causés par les migrations alternantes. L'hypothèse de préférence pour la centralité serait un moyen de prendre en compte à la fois les désagréments (temps de transport, fatigue) des migrations alternantes et les motivations du déplacement autres que celles relatives au travail. En dehors de cette interprétation, la préférence pour la centralité n'a pas lieu d'être dans le cadre des hypothèses posées par Alonso : l'espace est considéré comme isotrope. Toutefois, faire ou non l'hypothèse d'une préférence pour la centralité ne semble pas remettre en cause les résultats qualitatifs du modèle (Goffette-Nagot, 1994). L'absence de préférence pour la centralité sera l'hypothèse généralement retenue dans les modèles de la NEU.

Une des questions qui se pose est de savoir si la décroissance du prix du sol provoquée par un éloignement du centre est ou non compensée par les coûts de transport croissants. En outre, on peut avoir l'intuition du rôle de la structure des préférences des ménages : celui-ci doit arbitrer entre une plus grande consommation de logement et un éloignement du centre, censé diminuer son niveau d'utilité. A partir du modèle tel qu'il a été exposé ci-dessus, on dérive les conditions d'équilibre du consommateur en annulant les dérivées partielles premières de la fonction de Lagrange associée à ce problème.

Avec

$$L = U(X, S, D) - \lambda[Y - (p_X X + p(D)S + C(D))] \quad (2-63)$$

où λ est un multiplicateur de Lagrange. Les conditions du premier ordre s'écrivent :

$$\begin{cases} \frac{\partial L}{\partial X} = U'_X - \lambda p_X \\ \frac{\partial L}{\partial S} = U'_S - \lambda p(D) \\ \frac{\partial L}{\partial D} = U'_D - \lambda(p_D S + C_D) \\ \frac{\partial L}{\partial \lambda} = Y - [p_X X + p(D)S + C(D)] \end{cases} \quad (2-64)$$

On tire de ces équations :

$$\begin{cases} 1. \frac{U'_S}{U'_X} = \frac{p(D)}{p_X} \\ 2. \frac{U'_D}{U'_X} = \frac{p_D S + C_D}{p_X} \\ 3. Y = p_X X + p(D)S + C(D) \end{cases} \quad (2-65)$$

Les interprétations de ces conditions sont les suivantes. L'équation 3 du système précédent (2-65) renvoie à un résultat classique qui signifie que la contrainte de budget est saturée à l'optimum. L'équation 1 est également relativement classique. Il s'agit du taux marginal de substitution du sol au bien composite (rapport des utilités marginales de consommation de sol et du bien composite) qui est égal, à l'équilibre, au rapport de leur prix. Ce taux marginal de substitution entre sol et bien composite est fonction de la distance : selon la localisation du consommateur, ces deux biens voient leur utilité se modifier. Le taux marginal de substitution décroît avec la distance. Cela indique que la consommation de sol s'accroît avec l'éloignement du CBD. L'équation 2 fait intervenir la condition d'équilibre spatial. Selon cette équation, le taux marginal de substitution entre la distance et le bien composite doit être égal au rapport entre une quantité $p_D S + C_D$ et le prix du bien composite p_X . Ce rapport s'interprète comme un rapport de prix. La quantité $p_D S + C_D$ désigne alors le prix d'un déplacement marginal de la localisation du ménage : le premier terme de cette expression est le produit de la dérivée de la fonction du prix du sol et de la quantité de logement consommée par le ménage à l'équilibre ; il représente le gain sur la dépense en logement procuré par un éloignement infinitésimal du centre ; le second terme quant à lui désigne la dépense supplémentaire de transport supportée par le ménage pour un éloignement infinitésimal. Alonso nomme la quantité p_D

$S + C_D$: « coût marginal d'un mouvement spatial ». Coût de transport et frais de « localisation » varient en sens inverse : un rapprochement unitaire du centre se traduit par un accroissement de ces frais et une diminution de ces coûts de transport. La fonction d'utilité étant décroissante en fonction de la distance ($U'_D < 0$) et l'utilité marginale et le prix du bien composite étant positifs ($U'_X > 0, p_X > 0$), le coût marginal d'un éloignement du centre du lieu de résidence du ménage doit être négatif ($p_D S + C_D < 0$). En outre, comme la quantité de logement consommée S est positive, de même que le coût marginal du transport C_D , la dérivée de la fonction de prix du sol par rapport à la distance P_D doit elle aussi être négative. Cela signifie que le ménage, pour atteindre l'équilibre, se localise en un lieu où, d'une part, la fonction de prix du sol est décroissante et où, d'autre part, le gain sur la dépense en logement procuré par un déplacement marginal de localisation excédera la dépense en transport supplémentaire. On a ainsi les conditions de l'équilibre spatial du ménage.

Ces résultats peuvent s'exprimer de façon plus littéraire. Le premier résultat correspond à l'idée selon laquelle si, à l'équilibre, le ménage se trouvait dans une situation où la fonction de prix du sol était croissante, il aurait tout intérêt à se rapprocher davantage du centre : il économiserait sur le prix du sol, sur la dépense en transport et accroîtrait son utilité, puisque celle-ci est décroissante avec la distance. Le deuxième résultat est cohérent avec la remarque selon laquelle, si à l'équilibre le gain sur la dépense de logement procuré par un éloignement marginal était inférieur à la dépense supplémentaire en transport, le ménage préférerait se rapprocher du centre, puisqu'il diminuerait ainsi ses dépenses en augmentant son utilité. Ces résultats sont la conséquence logique des hypothèses faites sur la structuration spatiale de la ville : dans un cadre où la seule caractéristique permettant de distinguer deux localisations est la distance au centre, qui induit des coûts de transport, il est logique que les ménages n'acceptent de s'éloigner du centre qu'à condition de voir leur prix du logement décroître. C'est l'existence de coûts de transport - ainsi que la préférence pour la centralité dans le cadre des hypothèses d'Alonso - qui explique les conditions d'équilibre spatial des agents sur la ville.

Selon Goffette-Nagot (1994), les hypothèses d'existence de coûts de transport et celle de la préférence pour la centralité ne se situent pas au même plan. La première est essentielle au modèle alors que la deuxième n'est que contingente. En effet, l'absence d'une hypothèse de préférence pour la centralité (on suppose alors une indifférence par rapport à la localisation : $U'_D = 0$), qui est l'option retenue par Muth, ne remet pas en cause les résultats précédents. Au contraire, elle permet de les affiner. Ainsi, sous cette hypothèse (les autres hypothèses essentielles du modèle restant inchangées), l'équation (2) à l'équilibre est remplacée par $-p_D S = C_D$, dite condition de Muth. Cette nouvelle équation signifie cette fois que le gain marginal sur la dépense de logement est exactement compensé par la dépense marginale en transport.

4122. Le mécanisme d'enchère foncière

Ainsi, selon les modèles standards d'économie urbaine, la localisation intra-urbaine des ménages résulte d'un arbitrage entre accessibilité au centre, où sont localisés les emplois, et consommation de logement dont le prix diminue avec la distance au centre (Fujita,

1989). Cet arbitrage s'exprime à travers un mécanisme d'enchère foncière. Chaque localisation étant attribuée au plus offrant, on aboutit, dans un espace homogène, à la formation de courbes de rente foncière décroissantes avec la distance au centre. Alonso utilise le concept de courbes de rente offerte (ou courbe d'enchère). Il désigne ainsi le prix du sol $r(D)$ que les ménages sont prêts à payer, en fonction de la distance au centre, de façon à être à l'optimum et à conserver un niveau d'utilité constant. C'est à l'issue d'enchères individuelles (*bid-rents*) au plus offrant que la localisation de chaque ménage est définie, garantissant l'équilibre du consommateur, à savoir la maximisation de son utilité spatialisée sous contraintes. La répartition des ménages dans la zone résidentielle s'effectue à emprise de voirie donnée, l'offre totale des sols résidentiels est ainsi réduite par cette emprise. Chaque ménage va donc considérer la rente de marché comme un paramètre. Gannon (1992) qualifie ces enchères « d'enchères de localisation », dans la mesure où ce qui est convoité n'est pas le sol lui-même mais sa distance au CBD. On pourrait également les qualifier d'enchères d'accessibilité au CBD.

413. Les principaux résultats

A partir du cadre statique de son modèle, Alonso tire des résultats de statique comparative utiles pour la compréhension de certains aspects du développement urbain, et concernant la relation transport et formes urbaines. Nous nous intéresserons plus particulièrement aux résultats relatifs au transport.

4131. Effet d'une variation des coûts de transport

Les coûts de transport du salarié sont l'élément central de son arbitrage entre sa position dans l'espace et la valeur du sol qu'il est prêt à payer. Linéaires, ces coûts permettent à Alonso de déduire un profil d'offre de rente linéaire décroissant. Une détérioration des moyens de transport se traduit par une brusque augmentation des coûts de transport. Celle-ci entraîne alors une baisse des revenus nets dans toute la ville, donc un moindre « prix de réserve » pour les enchères, ce qui se traduit immédiatement par une plus grande « désirabilité » des localisations centrales, permettant d'économiser ces coûts. La pente de la rente de marché va s'accroître et la taille de la ville se réduire. Graphiquement, à consommation de bien composite donnée, ce choc se résume par un pivotement de la droite de budget dans l'espace (consommation de sol, distance) autour d'un point compris entre la limite de CBD et celle de la ville. Inversement, lorsque le coût de transport s'abaisse, cela a pour effet opposé de faire pivoter la droite de budget dans le sens contraire, et à rendre plus aplati le profil de la rente d'équilibre. Cette analyse est cependant grossière car seule une analyse précise des effets de substitution et de revenu permet de déterminer avec précision les conséquences d'une variation des coûts de transport. Goffette-Nagot (1994) en propose la lecture suivante :

Une amélioration des moyens de transport peut avoir deux effets : soit elle diminue la pénibilité des déplacements (et donc la désutilité de la distance), soit elle diminue les coûts de transport. Dans les deux cas, que l'action se fasse sur la fonction d'utilité des ménages ou sur la contrainte budgétaire, la pente des courbes de rente offerte diminue. La conséquence est en une diminution de la pente de la fonction de prix du sol qui

combine deux effets. La figure 2-5 schématise ces deux effets.

1.
Dans un premier temps, cette diminution de la pente de la fonction de prix du sol produira une diminution du prix en tout point (il s'agit d'un effet de prix), y compris au centre : la fonction du prix du sol, initialement en AB devient A'B', le niveau de rente atteint en B étant égal à la rente agricole.

2.
Cependant, du fait de cette diminution du prix du sol, il se produit dans un second temps un accroissement de la demande de sol (effet de revenu), qui amènera une translation de la courbe de prix du sol jusqu'en A''B''. Dans cette situation, on constate que les prix diminuent à l'intérieur d'un cercle de diamètre OM, alors qu'ils augmentent au delà. Cela s'explique par le fait que l'amélioration du transport provoque une diminution des pentes des courbes de rente offerte des ménages, qui sont donc amenés à se localiser plus loin que précédemment, ce qui permet aux ménages situés à proximité immédiate du centre de voir diminuer le prix du sol et donc de profiter aussi des effets de l'amélioration du transport.

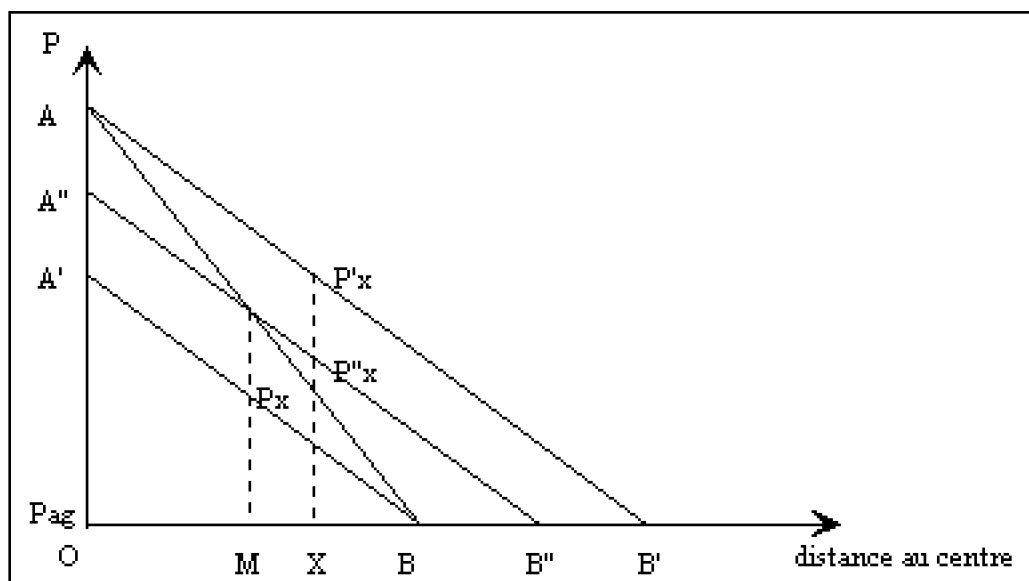


Figure 2- - Effets d'une amélioration des moyens de transport sur la fonction de prix du sol

Alonso fait remarquer que certaines modifications des moyens de transport peuvent avoir des effets opposés sur l'utilité et sur le coût de transport. Ainsi, la généralisation de la voiture particulière peut augmenter le confort des déplacements mais en augmenter également le coût. A l'inverse, l'augmentation de la population de la ville peut induire des économies d'échelle sur les moyens de transport et en diminuer le coût, mais du fait de la congestion en augmenter la pénibilité. Dans les deux cas, des effets contraires ne permettent pas de conclure sur la modification des courbes de rente offerte induite par ces changements.

Nous allons exposer brièvement les résultats quant aux effets d'une variation des

revenus et ceux d'une augmentation de la population.

4132. Effet de revenu et localisation résidentielle

Goffette-Nagot (1994) précise qu'il faut distinguer dans les effets de revenu, qui peuvent être mis en évidence à partir du modèle de base, les effets d'une augmentation générale des revenus et les effets d'une différenciation des revenus au sein de la population de la ville.

L'augmentation générale des revenus peut être considérée de la même façon qu'une diminution des coûts de transport, puisqu'il s'agit dans les deux cas d'une augmentation du revenu net des coûts de transport. Si, comme dans le cas des villes américaines, la préférence pour la consommation de sol est forte relativement à la préférence pour l'accessibilité, cela aboutira à une diminution de la pente des courbes de rente offerte. Cependant, si dans le cas d'une diminution des coûts de transport, on sait que le prix au centre doit diminuer (le revenu net au centre est constant et donc la demande de sol au centre ne varie pas), la conséquence d'une augmentation générale des revenus sur le prix au centre est quant à elle incertaine.

Fujita (1989) donne une démonstration explicite de la différence entre ces deux options envisagées sous hypothèse d'une absence de préférence pour la centralité. Dans le cas d'une augmentation générale des revenus, la variation du prix au centre dépend de la fonction de coût de transport et de la disponibilité au sol en fonction de la distance. Ainsi, pour un coût marginal de transport indépendant de la distance, si la disponibilité en sol augmente avec la distance (c'est le cas des villes circulaires), le prix au centre diminue alors que le prix en périphérie s'accroît ; si la disponibilité en sol est indépendante de la distance (cas des villes linéaires), le prix est constant au centre et s'accroît partout ailleurs ; si la disponibilité en sol se réduit quand on s'éloigne du centre (il peut exister des contraintes de zonage), le prix du sol augmente partout.

Les effets d'une différenciation des revenus au sein de la population ont également intéressé Alonso. Pour l'analyse de cet effet, il tente d'expliquer le phénomène de suburbanisation des villes américaines où les ménages les plus aisés se localisent dans des banlieues résidentielles lointaines, délaissant les centres-villes dont les logements se dégradent. Alonso essaye d'expliquer ce phénomène dans le cadre de son modèle. Sachant que ce sont les ménages qui ont les courbes d'enchères les plus pentues qui se localisent le plus près du centre, la répartition des ménages, en fonction de leur revenu, observée dans les villes américaines sera convenablement expliquée par le modèle si on arrive à montrer que les courbes de rente offerte sont d'autant plus pointues que le revenu est faible. L'examen de la dérivée de la courbe d'enchères à l'équilibre montre qu'il est impossible de conclure sur l'effet du revenu sur la pente de la courbe de rente offerte sans faire d'hypothèses supplémentaires. Il faut prendre en compte des considérations sur les préférences pour se faire une idée de l'effet du revenu sur la localisation résidentielle. C'est ce que fait Alonso, qui introduit une distinction lui permettant, à partir de ces résultats, d'expliquer à la fois le comportement des ménages dans les villes américaines et dans d'autres types de villes. En effet, la pente des courbes de rente offerte sera moins forte pour les ménages à haut revenu si l'effet de l'accroissement de l'utilité marginale de

l'accessibilité est moins forte que celle de l'augmentation de la quantité de sol consommée. Il explique ainsi que, dans les villes américaines, une forte préférence pour la consommation de sol conduit les ménages à hauts revenus à se localiser en périphérie : quand on considère un revenu supérieur, le taux de décroissance du rapport des utilités marginales est moins fort que le taux de croissance de la quantité de sol consommée. Au contraire, dans d'autres types de villes (il faut entendre entre autres les villes européennes), la taille moyenne des parcelles varie peu - soit pour des raisons de structure des préférences des ménages, soit, comme le fait remarquer Derycke (1982), du fait de contraintes sur la disponibilité de sol - et la faible augmentation de la quantité de sol ne pourra pas contrebalancer l'augmentation de la préférence pour la centralité ; les ménages aisés auront donc tendance à se localiser à proximité du centre.

Les développements des modèles de la NEU apportent une explication synthétique plus pertinente. Sous les hypothèses du mécanisme d'enchères au plus offrant conduisant à la formation des courbes de rente foncière décroissante avec la distance au centre, l'analyse de la localisation des ménages selon leur niveau de revenus revient à étudier la variation de la pente de la courbe de rente offerte avec le revenu. Hartwick *et al.* (1976) montrent que dans le cadre où les ménages ne se différencient que par leur revenu, où le logement est un bien normal et où on néglige les temps de transport, on aboutit à une situation dans laquelle les ménages se localisent d'autant plus loin du centre que leur revenu est élevé. En revanche, lorsque l'on introduit un temps de transport dont la valeur est croissante avec le revenu des ménages du fait de l'arbitrage entre travail et loisir, le résultat dépend de l'élasticité-revenu de la demande de logement comparée à l'élasticité-revenu du coût marginal de transport (Wheaton, 1977). Ainsi, si la demande de logement est plus sensible au revenu que le coût marginal de transport, les ménages aisés doivent se localiser en périphérie de la ville, ce qui leur permet de consommer davantage de logement, dont le prix unitaire est plus faible à distance du centre.

4133. Effet d'une augmentation de la population

Une augmentation de population va accroître la demande de sol dans la ville. La frontière urbaine n'étant pas fixe, si, dans un premier temps, on considère les consommations de sol par ménage comme inchangées, cela doit accroître la taille de la ville, et donc la distance à laquelle se situe la frontière, qui passe de B à B' (Cf. Figure 2-6). A la frontière, la rente foncière doit être égale à la rente agricole (P_{ag}), du fait de la concurrence pour l'utilisation du sol. En conséquence, si la forme des courbes de rente offerte est inchangée, les ménages qui sont localisés à la frontière se trouvent sur une courbe de rente offerte plus élevée, et donc à un niveau d'utilité inférieur. Comme la taille optimale des parcelles est décroissante avec le niveau d'utilité, ils vont donc diminuer leur consommation de sol, d'où une augmentation des densités sur la ville et du prix du sol en tout point, qui par exemple en passe de P_X à $P_{X'}$.

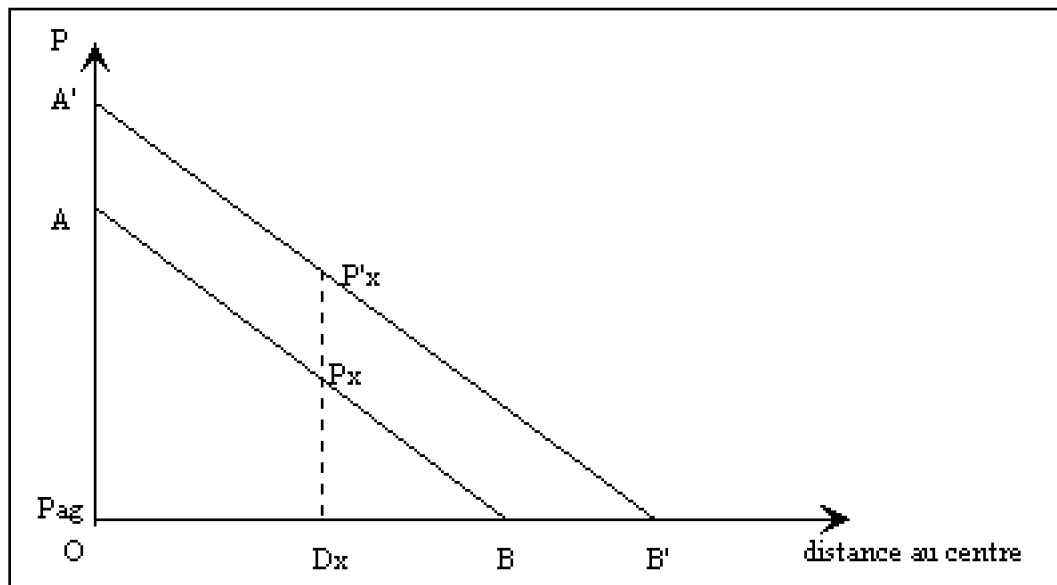


Figure 2- - Effet d'une augmentation de la population

Finalement, une augmentation de la population urbaine produit un accroissement de la superficie de la ville, une hausse de la rente foncière en tout point, une augmentation des densités urbaines.

42. Critiques et élargissements du modèle de base

Les principales critiques adressées au modèle d'Alonso tiennent dans le caractère réducteur des hypothèses concernant la représentation de la ville et en particulier celles concernant la représentation du système de transport. En effet, le système de transport n'est pas réellement envisagé en tant que tel, il existe uniquement par le biais d'une distance au centre. Il est, d'une part, restreint à un seul mode de transport, en l'occurrence le mode routier, et d'autre part, à un réseau de transport de configuration radiale. Le phénomène de congestion n'est pas envisagé et les coûts unitaires de transport sont supposés constants. Enfin, le modèle prend en considération uniquement le déplacement domicile-travail. Cependant, le modèle d'Alonso a donné lieu à différents élargissements formant le courant de la Nouvelle Economie Urbaine (NEU). En particulier, divers auteurs, motivés par le caractère restrictif de ces hypothèses et par la volonté de rendre compte d'un problème empirique particulier, ont tenté d'améliorer le modèle initial en levant certaines de ces hypothèses et en ajoutant certaines autres. Ces extensions ne remettent pas pour autant en cause les grands résultats du modèle. Ainsi, les formulations proposées tendent à accentuer progressivement le réalisme des modèles eu égard à la structure actuelle des villes. Cependant, la complexité inhérente à toute analyse spatiale limite le nombre d'hypothèses susceptibles d'être relâchées simultanément (Goffette-Nagot, 1994).

421. La prise en compte du réseau de transport

Bien que la variable coût de transport tienne une place essentielle dans le modèle, la représentation du réseau de transport est très sommaire, réduite à une fonction de

distance au centre. Certains auteurs ont essayé d'introduire une représentation du transport plus réaliste notamment dans le traitement de la voirie (4211), dans la prise en compte du transport comme secteur de production de services (4212), en envisageant la concurrence entre modes de transport (4213), en introduisant la congestion (4214) et enfin en considérant un réseau de transport bi-modal (4215).

Un des premiers auteurs à avoir envisagé le transport de façon un peu plus approfondie est Wingo (1961). Ses travaux, bien qu'antérieurs à ceux d'Alonso, en sont un complément. Ces travaux présentent l'intérêt d'approfondir l'effet du système de transport (amélioration de la technologie et de l'offre, étude des coûts généralisés de transport intégrant la valeur du temps de déplacement) sur la distribution spatiale des valeurs foncières et des densités résidentielles. D'après Derycke (1982), l'apport de Wingo est double. Premièrement, il apporte un meilleur traitement du coût de l'éloignement du centre. En effet, le coût de transport chez Alonso est traité de manière fruste puisqu'il est supposé varier linéairement avec la distance au centre. Le coût de transport chez Wingo est un coût généralisé de déplacement pour une journée de travail, comportant trois éléments, dont un seul est envisagé par Alonso. Le premier est la dépense monétaire liée à la longueur des déplacements, le deuxième est la dépense monétaire liée au nombre des déplacements, le troisième est la valeur monétaire du temps de trajet. Le temps de trajet dépend à son tour de plusieurs attributs : de la distance parcourue, de la vitesse de transport selon le mode emprunté, du nombre d'utilisateurs du mode de transport et de la capacité d'écoulement du système de transport. Ces deux derniers éléments permettent à Wingo d'introduire d'intéressantes considérations sur les facteurs de congestion du trafic. Le deuxième apport est lié aux problèmes d'estimation de la valeur du temps de trajet.

4211. Le traitement de la voirie dans les modèles urbains

Dans la plupart des modèles de la NEU, le réseau de transport est envisagé comme un problème de surface de voirie. Les modèles tentent de déterminer le partage de l'usage des sols dans l'anneau résidentiel entre le logement et la voirie, à savoir le rapport entre surface de voirie et surface totale. Selon le degré de sophistication des modèles, ce rapport est envisagé soit comme une constante (à distance donnée du centre), soit comme une variable exogène, soit comme une variable endogène. Les modèles de Livesey (1973) et de Legey, Pipper et Varaiya (1973) étudient les valeurs du rapport dans le centre-ville. Par ailleurs, dans le modèle de base, on considère que les ménages peuvent se déplacer le long des rayons joignant leur lieu de résidence et le CBD. Le réseau de transport, de structure radiale, est donc supposé suffisamment dense pour que les coûts de transport vers l'axe radial le plus proche soient négligeables. Cependant, il est évident que cela ne correspond pas à la réalité. Certains modèles ont tenté d'utiliser des métriques circum-radiales, de façon à introduire la possibilité de déplacement sur des anneaux périphériques de contournement, sur lesquels la vitesse peut être différente de celle sur les axes de transport radiaux (Perreur, Thisse, 1974). Rapidement, les analyses deviennent malheureusement complexes et les profils de rente difficiles à déterminer. Krauss (1974) a tenté, en conservant l'hypothèse d'un seul mode de transport, de compléter le système radial par l'introduction d'un réseau routier circonférentiel.

4212. La prise en compte du secteur des services de transport

Mills (1967) propose un modèle d'équilibre spatial en production pour l'ensemble des secteurs productifs intra-urbains, partant de l'observation que le rapport du capital à l'emprise foncière varie considérablement selon la localisation d'une part, et le secteur d'activité d'autre part. En effet, construction immobilière (bureaux et logement), transport (« privé » ou public) ou production industrielle font du sol un usage très différent, soit plutôt extensif (voirie, pavillons) en périphérie, soit plutôt intensif (immeuble de bureau, métro) dans la zone centrale de la ville. Autrement dit, la rationalité commande l'usage le plus efficace du sol : là où sa rareté est la plus forte (en bordure du centre), il supportera les plus forts investissements en capital, tandis que les zones les plus périphériques se caractériseront par des usages plus extensifs. Ce modèle représente la première tentative de modélisation analytique ambitieuse du problème de l'usage optimal des sols urbains qui s'écarte de la voie tracée par Alonso (Gannon, 1992). En effet, les préférences des ménages ne sont pas envisagées explicitement, mais on leur substitue les fonctions de production de trois secteurs productifs : celui des biens, celui du transport, et celui du logement. Mills adopte alors une logique de production qui le rapproche de Thünen et lui permet de déterminer par le biais des rendements d'échelle le même type d'usage des sols que ce dernier : au centre est implanté le secteur monopolistique à technique de production très « *land intensive* » tandis qu'en périphérie la constance de leur rendement d'échelle associée à la substituabilité de leurs facteurs de production permet aux secteurs « résidentiels » (services liés au logement et à la voirie) d'être indifférents à la distance au centre, donc d'offrir leurs services en tout endroit.

4213. La concurrence entre les modes de transport

Capozza (1973) propose également un modèle d'équilibre spatial en production mais alors que Mills considère un seul mode de transport, l'automobile, Capozza cherche à préciser l'avantage économique d'une complémentarité entre modes de transport se différenciant par leurs besoins respectifs d'emprise foncière. Le modèle présente deux modes de transport, qualifiés respectivement de privé (l'automobile) et de public (métro) que les ménages empruntent en fonction de leur lieu de résidence. Réduite à un choix binaire, la dualité modale va permettre à Capozza d'envisager le meilleur usage des sols par le biais de l'intensité capitalistique (en terme d'unité de surface et non par salarié) de chacun des deux modes, privé et public. Cette approche repose sur l'idée d'une différenciation des deux modes sur la base de cette intensité : le métro (choisi par Capozza pour sa non-utilisation de sol), dont l'exploitation fait appel à des infrastructures très lourdes, nécessitera relativement plus de capital par unité de service produite que l'automobile. La production du service de voirie combine du capital (nécessaire à la construction et à l'entretien de la chaussée, d'une part, et à l'acquisition du véhicule ainsi qu'à son entretien également d'autre part) et du sol. Formellement, ces hypothèses se traduisent par deux fonctions de production distinctes. A la différence de l'automobile, le métro n'utilise pas de facteur sol ; il est sans emprise de surface. Cela suppose que l'on tient pour négligeables les surfaces à l'air libre occupées par les bouches du métro. Le prix du service du métro est posé indépendant de la distance, il est forfaitaire. Ce résultat

est parfaitement logique selon Gannon (1992) puisque la localisation de la consommation de services de transport perd toute signification économique en sous-sol. Ainsi, le coût de transport en métro est une fonction linéaire positive de la distance parcourue. Le coût de transport individuel domicile-travail en automobile est, en revanche, une fonction croissante de la rente foncière puisqu'il incorpore une consommation de sol. Ainsi, sachant que la rente foncière sera une fonction décroissante de la distance, il coûtera de plus en plus cher, en terme de coût marginal, d'emprunter la voirie lorsque l'utilisateur se rapproche du CBD (l'opposé est vrai lorsqu'on s'en éloigne). *A contrario*, le métro sera très économique pour des distances faibles, donc des trajets effectués dans les zones les plus centrales de la ville. En termes de résultats, Capozza oppose le cas de la « ville routière » au cas de la « ville métro ». La première est moins dense, plus étalée, plus diffuse, plus suburbanisée. En revanche, la seconde est moins rapidement congestionnée. Le gradient de rente foncière sera donc plus convexe dans la première que dans la seconde.

Par ailleurs, à partir de l'analyse de différents types de ville (ville-automobile, ville-métro, ville-mixte), Capozza envisage la conséquence de l'introduction d'un réseau de métro dans une ville « automobile », afin de mesurer l'avantage d'une telle modification de l'offre de transport. Il part d'une constatation évidente : dans les grandes agglomérations, où l'usage des sols s'intensifie très fortement dans les zones les plus centrales, la voirie représente une source de raréfaction supplémentaire de la ressource foncière dont les entreprises des secteurs autres que le logement ont besoin pour leur production. Sachant qu'un mode de transport existe qui économise totalement ce facteur, une allocation optimale des sols entre les deux modes doit tenir compte de cette substitution de techniques de production du service de transport. En termes de résultats, outre un effet d'extension de la ville en périphérie, il y a un impact important sur les prix du logement, mais dans une mesure qu'il est malaisé de prédire. Quand à l'effet redistributif du nouveau mode de transport sur le revenu des agents, Capozza pense qu'à court terme les usagers des transports collectifs sont bénéficiaires, mais qu'à plus long terme seuls les propriétaires fonciers le sont, dans la mesure où les gains de transport sont capitalisés dans la valeur des logements et internalisés dans la rente foncière. Ainsi, en termes de configuration urbaine, la ville à deux modes se caractérisera par l'existence de deux zones résidentielles contiguës à l'exclusivité modale. Les salariés résidant dans la zone la plus proche du CBD seront usagers du métro, tandis que ceux habitant dans la zone la plus périphérique seront à la fois automobilistes et usagers du métro, du fait du zonage modal. Cela implique alors une rupture de charge pour les seconds. Il existe une distance appelée distance d'indifférence ou d' « échange » modal, pour laquelle le prix unitaire du service de transport est identique pour les deux modes, et en deçà de laquelle ce prix est moindre pour le métro, et inversement pour des grandes distances. Une telle politique de complémentarité modale assure donc la meilleure utilisation possible des surfaces disponibles : elle est dite efficace.

Si le modèle de Capozza, d'inspiration très proche du modèle de Mills, permet d'inférer des résultats intéressants en matière d'usage des sols, notons cependant que l'hypothèse de fluidité du trafic enlève quelque peu de la pertinence à son analyse.

4214. La prise en compte de la congestion

Dans une optique de développement urbain, il est pertinent de se poser la question des conséquences de la croissance de la population et ses effets sur l'usage du réseau de transport. En effet, l'augmentation des migrations alternantes en direction du centre entraîne des phénomènes de congestion. Les travaux sur la congestion se sont intéressés essentiellement aux aspects de la tarification optimale de la congestion. Nous ne développerons pas cet aspect, mais retiendrons les conclusions de l'effet de la congestion sur les profils de rente et les densités, c'est-à-dire l'effet de la congestion sur les localisations urbaines.

Il existe deux moyens principaux de prendre en compte la congestion : soit intégrer un coût de transport fonction de la densité du trafic dans la contrainte budgétaire du ménage, soit prendre en compte dans la fonction d'utilité du ménage le temps de loisir, fonction de la densité du trafic. En outre, on doit poser des hypothèses sur l'importance de la congestion en fonction de la distance au centre. Nous avons vu que Wingo, le premier, définit une fonction complexe de coût de transport tenant compte de la capacité d'écoulement de la voirie. Dans les années 70, divers auteurs intègrent explicitement la congestion dans les modèles : De Ferranti (1971), Solow-Vickrey (1971), Solow (1972), Dixit (1973), Riley (1973) et d'autres.

En particulier, Solow (1972) revient sur le modèle standard de la NEU, dans sa version parachevée par Mills (1967) pour critiquer l'hypothèse simplificatrice de la linéarité des coûts de transport domicile-travail, permettant l'écriture de la condition nécessaire de l'équilibre spatial des ménages :

FORM266

. $H(D)$: surface de logement,

. $R_D(D)$: rente unitaire à l'équilibre en k .

Implicitement pour Solow, ne pas considérer l'encombrement de la voirie urbaine comme un phénomène spatialisé diminue la pertinence des modèles analytiques d'usage des sols.

Solow distingue deux éléments dans le coût de transport T_D :

. un élément $T_1(D)$ proportionnel à la distance ;

. un élément $T_2(D)$ proportionnel à la densité du trafic, c'est-à-dire au nombre de migrants N_D rapporté à la surface de la voirie S_D :

$$T_D = T_1(D) + T_2(D) = bD + c \frac{N_D}{S_D} \quad (2-67)$$

où b et c : paramètres positifs et $S_D = 2 \pi D(1 - \alpha_D)$.

Solow introduit ensuite l'expression de T_D dans toutes les équations du modèle de base. L'équation précédente est d'ailleurs un cas particulier de la fonction de congestion de Vickrey (1965) :

$$T_D = bD + c \left[\frac{N_D}{S_D} \right]^d \quad (2-68)$$

avec $d \geq 1$, élasticité du coût de congestion à la densité de trafic. Chez Solow $d=1$ (1972) (1973) et le cas $c=0$ correspond à l'absence de congestion.

La prise en considération de la congestion a plusieurs conséquences. La première est que le tarif de transport n'est plus efficace dans la mesure où le coût marginal social excède le coût marginal privé de transport.

Les conséquences de la congestion sur le profil des rentes foncières et des densités résidentielles ont également été étudiées par Solow (1973) et par Kanemoto (1975). Ce dernier montre que la densité du trafic est une fonction décroissante de la distance qui s'annule à la limite de la ville (par hypothèse, on raisonne dans un contexte intraurbain, on ne tient pas compte du trafic interurbain). La densité de trafic permet d'expliquer l'externalité de congestion, dès lors on peut énoncer que le degré de congestion diminue au fur et à mesure qu'on s'éloigne du centre. Ainsi donc, le coût de transport augmente plus fort près du CBD où la congestion du trafic est importante et moins fort à la périphérie, où l'encombrement est négligeable. Etant donné la relation de complémentarité entre la rente foncière et les coûts de transport, on peut dire que la rente (plus précisément, la rente de situation) diminue plus fort près du CBD et moins fort à la périphérie. On obtient donc une fonction plus convexe. Ainsi, l'introduction de la congestion dans le modèle standard conduit à augmenter le degré de convexité des profils de rente. L'effet premier et essentiel de la congestion est de déformer la structure des revenus nets des coûts de transport des ménages et par la même modifier leurs enchères de rente, qui traduiront à l'optimum la vraie valeur unitaire, plus basse qu'en cas de fluidité du trafic, de chaque localisation, envisagée en termes d'accessibilité au CBD. En d'autres termes, la conséquence de la congestion est de distordre l'espace, de lui faire perdre littéralement son isotropie originelle. Si l'on rappelle que la rente est une rente d'accessibilité au centre-ville, lieu d'emploi unique (Gannon, 1992), cette externalité rend concrètement moins proches les domiciles du CBD, d'autant plus qu'ils s'en rapprochent à vol d'oiseau.

Derycke et Gannon (1990) ont démontré que l'introduction de la congestion pouvait aboutir à des profils de rente foncières non convexes. Ceci peut s'expliquer par le fait que le marché foncier ou résidentiel intègre dans ses prix les niveaux de congestion, qui viennent eux-mêmes perturber l'allure de la courbe des coûts de transport généralisés. A

l'équilibre, les ménages vont incorporer les nuisances que la congestion leur fait subir, en termes de temps perdu dans les encombrements, et leurs enchères sur les marchés fonciers et résidentiels seront telles qu'elles favoriseront la hausse des prix aux endroits où la congestion induit la perte de temps la plus faible, d'une part, et où l'économie réalisée sur le plan des nuisances l'emporte sur les dépenses supplémentaires de transport liées à l'éloignement du centre-ville, d'autre part et toutes choses égales par ailleurs.

Les effets de l'introduction de la congestion dans le modèle standard sur les profils de densité résidentiels sont assez similaires. On rappelle qu'en situation sans congestion, la densité résidentielle est une fonction décroissante et convexe par rapport à la distance au centre. Lorsque l'on introduit la congestion, le degré de convexité résidentielle s'élève suite à l'introduction des coûts de congestion. Ce résultat s'explique aisément : là où la rente est plus faible suite à l'introduction des coûts de congestion, la superficie consommée par chaque ménage sera plus importante et donc la densité résidentielle y sera plus faible.

4215. La prise en compte d'un réseau de transport bi-modal

Anas et Moses (1979) proposent un modèle permettant d'examiner les impacts d'un réseau de transport bi-modal sur l'équilibre de l'usage des sols résidentiels et donc sur les formes urbaines. Les auteurs visent donc à dépasser l'hypothèse de parfaite divisibilité du réseau et celle d'unimodalité du modèle standard. Le modèle standard d'Alonso-Muth basé sur des déplacements unimodaux ainsi qu'une forme urbaine circulaire peut être alors considéré comme un cas particulier.

Dans ce modèle, le système de transport est composé de deux types de mode ou réseau. Le mode 1 est constitué d'un système peu dense de voies structurantes radiales, chacune ayant sous son influence une aire de marché définie par un angle. On suppose que l'accès à ces lignes structurantes radiales est permis par un réseau dense de voirie. Chaque ligne radiale représente soit une autoroute, soit une infrastructure lourde de transport collectif. Le mode 2 est constitué d'un système dense de routes radiales secondaires concurrentielles avec les principaux corridors radiaux définis précédemment. Ce réseau dense représente les lignes de bus ou les routes secondaires. Sous ces hypothèses de déplacements bi-modaux, les analyses de l'équilibre conduisent à dégager différentes formes urbaines basiques, chacune étant le résultat des différentes combinaisons entre les coûts fixes de transport qui ne varient pas avec la distance et les coûts d'accès ou les coûts radiaux qui eux varient avec la distance.

a. Les hypothèses de base

Considérons un CBD circulaire desservi par des corridors de transport régulièrement espacés et identiques qui se rejoignent au centre du district. Les corridors radiaux sont soit des autoroutes, soit des lignes de transports collectifs lourds. La largeur de ceux-ci est constante. Le centre urbain d'affaire est également desservi par un réseau dense de voies radiales. Ce système représente le réseau de déplacements à basse vitesse en automobile ou en bus.

Plusieurs hypothèses sont posées :

H_1 . Les coûts liés à un changement de mode sont suffisamment élevés pour interdire le changement. Il n'y a pas de report modal. Tous les déplacements se terminent au CBD. Les coûts de transport à l'intérieur du CBD et leurs impacts sur la localisation des firmes sont ignorés.

H_2 . Les coûts et les temps de transport à partir de n'importe quelle localisation ne sont pas affectés par la congestion. Ce sont des fonctions croissantes de la distance uniquement.

H_3 . Les ménages sont supposés être identiques et chacun décide du nombre d'heures travaillées au taux de salaire en vigueur. Les ménages sont des maximisateurs d'utilité. Les salaires sont les seuls sources de revenus.

b. Le comportement des ménages

En chaque localisation (x, θ) , étant l'angle entre la localisation et la ligne radiale la plus proche, les ménages cherchent à maximiser leur fonction d'utilité :

$$\max_{Z, Q, L, h} U = U[Z, Q, L] \quad (2-69)$$

sous contrainte

$$wH - Z - R(x, \theta) \cdot Q - w[Th(x, \theta) + L] - Ch(x, \theta) = 0 \quad (2-70)$$

où :

Z : bien composite en valeur,

Q : surface de sol,

L : temps de loisir,

w : taux de salaire,

H : temps total disponible (à répartir entre le travail, les déplacements et les loisirs),

$R(x, \theta)$: rente foncière par unité de sol,

$Th(x, \theta)$: temps de déplacement à partir de (x, θ) jusqu'à $(0, 0)$, le CBD, pour un mode h .

Ch : coût monétaire du déplacement de (x, θ) à $(0,0)$ pour un mode h .

Ceci conduit aux conditions suivantes :

$$R(x, \theta) = U'_Q / U'_Z \quad (2-71)$$

$$w = U'_L / U'_A \quad (2-72)$$

et

$$R(x, \theta)/w = U'_Q / U'_L \quad (2-73)$$

On définit la fonction de coût de transport généralisé :

$$Gh(x, \theta) = wTh(x, \theta) + Ch(x, \theta) \quad (2-74)$$

La recherche de la maximisation de l'utilité conduit chaque ménage à choisir le mode de déplacement qui présente le coût généralisé le plus faible. Ainsi :

$$G^*(x, \theta) = \min_h [Gh(x, \theta); h = 1, 2] \quad (2-75)$$

c. Le comportement du propriétaire foncier

Puisque chaque propriétaire terrien loue au niveau de l'enchère la plus élevée :

$$R(x, \theta) \equiv \max_h [\tilde{R}h(x, \theta); h = 1, 2] \quad (2-76)$$

où les rentes d'enchères sont définies par :

$$\tilde{R}h(x, \theta) \equiv [wH - Z^* - wL^* - Gh(x, \theta)] / Q^* \quad (2-77)$$

où (*) représente les quantités d'équilibre.

En chaque localisation (x, θ) , le ménage qui offre l'enchère la plus élevée est le ménage qui emprunte le mode associé au coût généralisé le plus faible. Intuitivement alors, les usagers du mode 1 enchèreront sur les autres à proximité des lignes radiales tandis que les usagers du mode 2 seront localisés loin des lignes radiales.

d. L'équilibre spatial

A l'équilibre, aucun ménage ne peut augmenter son utilité en modifiant son choix combiné

du mode de transport et de localisation. La rente foncière doit s'ajuster à travers la ville. Le lagrangien de (2-69) sous contrainte de (2-70) est dérivé partiellement en fonction de x et de θ :

$$\frac{\partial L(x, \theta)}{\partial x} = 0 \Rightarrow Q(x, \theta) \frac{\partial R(x, \theta)}{\partial x} + \frac{\partial G^*(x, \theta)}{\partial x} = 0 \quad (2-78)$$

$$\frac{\partial L(x, \theta)}{\partial \theta} = 0 \Rightarrow Q(x, \theta) \frac{\partial R(x, \theta)}{\partial \theta} + \frac{\partial G^*(x, \theta)}{\partial \theta} = 0 \quad (2-79)$$

A l'équilibre tout sol résidentiel disponible en chaque localisation (x, θ) doit être utilisé. En notant le sol disponible en (x, θ) par :

$$dA = \xi(x, \theta) x dx d\theta \quad (2-80)$$

$\xi(x, \theta)$ est la proportion de sol offert affecté à l'usage résidentiel,

et la densité en (x, θ) , $m(x, \theta)$, exprimant l'équilibre offre-demande en (x, θ) par :

$$m(x, \theta) x dx d\theta = Q(x, \theta)^{-1} \xi(x, \theta) x dx d\theta \quad (2-81)$$

Anas et Moses proposent d'étudier une solution spécifique. Ils posent alors trois hypothèses additionnelles.

H₄. La fonction d'utilité est de type Cobb-Douglass et est donnée par :

$$U(x, \theta) = Z(x, \theta)^\alpha Q(x, \theta)^\beta I(x, \theta)^\gamma \quad \alpha, \beta, \gamma > 1 \quad (2-82)$$

H₅. Pour chaque mode, les coûts et les temps de déplacements sont des fonctions linéaires des distances d'accès et des distances radiales.

Pour le mode 1 :

$$C_1(x, \theta) = cf_1 + cr_1x + ca_1\theta \quad (2-83)$$

$$T_1(x, \theta) = tf_1 + tr_1x + ta_1\theta \quad (2-84)$$

où f représente les coûts fixes, indépendants de la distance, r représente les coûts unitaires de déplacements radiaux et a le coût unitaire d'un déplacement d'accès.

$$G_1(x, \theta) = gf_1 + gr_1x + ga_1\theta \quad (2-85)$$

où

$$gf_1 \equiv cf_1 + wt_1f_1 ; \quad gr_1 \equiv cr_1 - wt_1r_1 ; \quad ga_1 \equiv ca_1 + wt_1a_1 \quad (2-86)$$

Pour le mode 2 :

$$C_2(x, \theta) = cf_2 + cr_2x \quad (2-87)$$

$$T_2(x, \theta) = tf_2 + tr_2x \quad (2-88)$$

$$G_2(x, \theta) = gf_2 + gr_2x \quad (2-89)$$

où

$$gf_2 \equiv cf_2 + wtf_2 ; gr_2 \equiv cr_2 + wtr_2 \quad (2-90)$$

H₆ . La proportion de sol allouée à l'usage résidentiel est invariant avec la localisation :

$$\xi(x, \theta) = \xi \quad (2-91)$$

Nous obtenons des fonctions de demande solutions de (2-71) à (2-73) :

$$Z(x, \theta) = (\alpha / \alpha + \beta + \gamma) [wH - G^*(x, \theta)] \quad (2-92)$$

$$Q(x, \theta) = (\beta / \alpha + \beta + \gamma) [wH - G^*(x, \theta)] R(x, \theta)^{-1} \quad (2-93)$$

$$L(x, \theta) = (\gamma / \alpha + \beta + \gamma) [wH - G^*(x, \theta)] w^{-1} \quad (2-94)$$

En utilisant la seconde de ces fonctions dans (2-78) et (2-79) et en résolvant ces équations différentielles par une intégration, on obtient le gradient de rente foncière qui permet d'atteindre l'équilibre :

FORM295

où $R_0 \equiv R(0,0)$ et est relatif à une constante d'intégration. Ceci représente l'enchère foncière résidentielle pour le sol au centre du CBD.

$$R_0 = R_A \left[1 - G_1(x, \bar{\theta}_1(x)) / wH \right]^{-(\alpha+\beta+\gamma)/\beta} \quad (2-96)$$

et/ou

$$R_0 = R_A \left[1 - G_2(\bar{x}_2(\theta), \theta) / wH \right]^{-(\alpha+\beta+\gamma)/\beta} \quad (2-97)$$

Pour déterminer le niveau d'utilité d'équilibre U^* , nous évaluons (2-69) à la limite de la ville et obtenons l'expression de l'utilité indirecte :

$$U^* = (const) \left[wH - G_1(x, \bar{\theta}_1(x)) \right]^{\alpha+\beta+\gamma} R_A^{-\beta} \cdot w^{-\gamma} \quad (2-98)$$

et/ou

$$U^* = (const) \left[wH - G_2(\bar{x}_2, x) \right]^{\alpha+\beta+\gamma} R_A^{-\beta} \cdot w^{-\gamma} \quad (2-99)$$

à partir de (2-81) on écrit :

$$gf_1 + gr_1 x + ga \tilde{\theta}(x) x = gf_2 + gr_2 x \quad (2-100)$$

d'où

$$\tilde{\theta}(x) = \frac{gf_2 - gf_1}{ga} x^{-1} + \frac{gr_2 - gr_1}{ga} \quad (2-101)$$

$$\lim_{x \rightarrow \infty} \tilde{\theta}(x) = (gr_2 - gr_1) / ga \quad (2-102)$$

Nous savons que :

$$G_1(\bar{x}_1, 0) = G_1(x, \bar{\theta}_1(x))$$

$$gr_1 \bar{x}_1 = ga x \bar{\theta}_1(x) + gr_1 x$$

d'où

$$\bar{\theta}_1(x) = (gr_1 / ga) \bar{x}_1 \cdot x^{-1} (gr_1 / ga) \quad (2-103)$$

En évaluant ceci en $x=c$, c'est-à-dire à la moitié de la limite de l'aire de marché $\bar{\theta}_1(c) = \pi / n$, on obtient :

$$c(\bar{x}_1, n) = \left[\frac{\pi}{n} + \frac{gr_1}{ga} \right]^{-1} \left[\frac{gr_1}{ga} \bar{x}_1 \right] < \bar{x}_1 \quad (2-104)$$

nous notons :

$$\lim_{\substack{n \rightarrow \infty \\ k \rightarrow \infty}} c(\bar{x}_1, n) = \bar{x}_1 \quad (2-105)$$

Ceci établit que lorsque le nombre de lignes radiales augmente dans la ville, on se

rapproche du modèle standard circulaire de Muth.

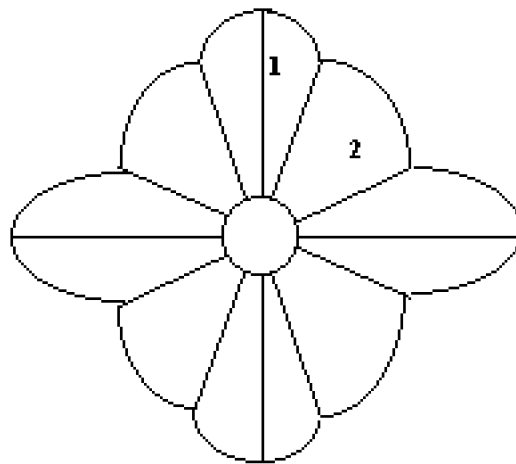
Les auteurs étudient sur cette base un ensemble de configurations urbaines en posant différentes hypothèses sur la structure respective des coûts de transport des modes.

CAS 1 : Dans un premier temps, les auteurs étudient le cas où les coûts fixes sont égaux pour les deux modes de transport : $gf_1 = gf_2$.

Pour ce cas, on a alors :

$$\tilde{\theta}(x) = (gr_2 - gr_1) / ga$$

Les aires de marché peuvent être illustrées par la figure suivante :



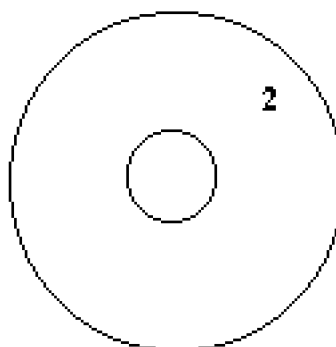
on a

$$\bar{x}_2 = (gr_1 / gr_2) \bar{x}_1 \quad (2-106)$$

Cette figure représente une forte compétition entre le système d'autoroutes et le réseau de voiries secondaires.

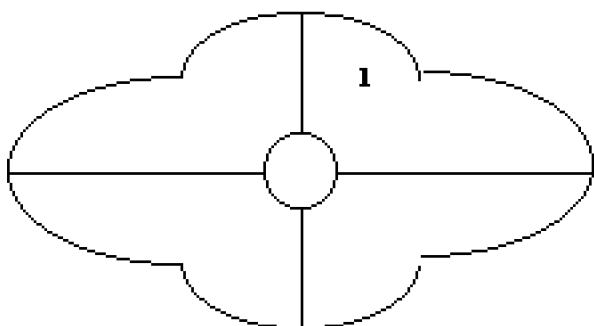
CAS 2 : Lorsque $gr_2 \rightarrow gr_1$, $\bar{x}_2 \rightarrow \bar{x}_1$ et $\tilde{\theta}(x) \rightarrow 0$, on se ramène à un cas

unimodal dans lequel uniquement le mode 2 est utilisé. Ceci correspond au modèle standard et illustre le cas d'une petite ville desservie par un réseau de transport dense.

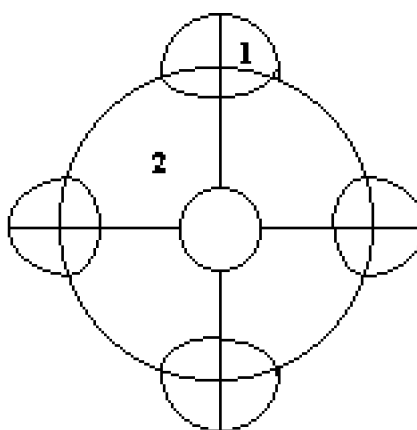


CAS 3 : Inversement, si $gr_2 \gg gr_1$, $\tilde{\theta}(x \geq a) \geq \pi/m$. Nous obtenons un autre

cas unimodal pour lequel ce sont les lignes radiales qui sont utilisées. Ceci illustre le cas d'une ville desservie par un réseau d'autoroute clairsemé.



CAS 4 : Dans ce cas, les coûts fixes respectifs des modes 1 et 2 ne sont plus posés comme égaux. Des résultats plus réalistes sont alors obtenus. On considère par exemple que $gf_1 > gf_2$. Les coûts fixes pour le mode 1 sont plus importants, ce qui implique une diminution des aires de marché des lignes radiales dans la périphérie. Ce cas est illustré comme suit :



Si le système radial représente une ligne ferroviaire, alors les navetteurs localisés près du centre vont éviter d'emprunter ce mode du fait de la tarification élevée et seules les personnes résidant en périphérie utiliseront ces lignes.

Ce modèle tend à montrer l'impact du type de réseau de transport sur les

localisations urbaines. Dans ce modèle, les formes urbaines sont conditionnées par le type de réseau de transport desservant la ville et surtout par la combinaison de leurs coûts généralisés. Dans la mesure où les ménages cherchent à minimiser les coûts généralisés de transport pour leurs déplacements vers le CBD, ce sont les aires de marché des modes en compétition qui structurent la ville.

422. La prise en compte des externalités et le phénomène de capitalisation

Le schéma classique de la ville ne différencie les lieux que par leur distance au centre d'emploi. Divers travaux ont été développés afin de tenir compte du fait que les choix de localisation résidentielle des ménages se fondent sur d'autres éléments que la seule accessibilité à leur centre d'emploi. Certains auteurs, dont Alonso lui-même, ont introduit des variables d'externalités dans le modèle standard. Nous examinerons brièvement le modèle de localisation des ménages avec aménités et ses conséquences en termes de capitalisation. Le phénomène de capitalisation est un des moyens d'analyse théorique de l'interaction entre urbanisation et transport.

4221. Le modèle de choix résidentiel avec externalités

Dans cette approche, les ménages désirant résider dans une commune doivent faire face à un choix de localisation complexe. Ce choix est décrit comme un arbitrage entre différents critères : l'accessibilité, la taille du logement, et les aménités. Ces dernières sont provoquées par l'environnement naturel et les caractéristiques de voisinage comme la sécurité, la qualité des écoles, la proximité d'équipements publics. L'accessibilité correspond aux coûts pécuniaires et en temps des déplacements. Ainsi, chaque ménage arbitre entre ces trois facteurs en fonction de ses contraintes de temps et de revenu. Dans le modèle de choix résidentiel avec externalités (Alonso, 1964, repris de Beckerich, 1997), une variable d'aménités est introduite dans la fonction d'utilité des ménages. Ainsi, tous les ménages ont pour fonction d'utilité $U(z,s,E(x))$ avec z l'offre de bien composite, s la taille du logement, et $E(x)$ le niveau d'aménité de chaque localisation x . La variable $E(x)$ représente les externalités produites par les biens publics locaux (ou par un agent économique). Chaque localisation se distingue alors par sa distance au centre et par son niveau d'aménités.

Soit $G(x)$: le niveau de la taxe locale,

Y^o : le revenu du ménage avant impôt,

$T(x)$: le coût de transport,

$R(x)s$: les dépenses de logement pour chaque localisation x ,

alors le modèle correspond au programme de maximisation suivant :

$$\underset{x,z,s}{Max} U(z,s,E(x)) \quad (2-107)$$

sous la contrainte

$$z + R(x)s = Y^o - G(x) - T(x) \quad (2-108)$$

Pour expliquer les arbitrages des ménages lors du choix de leur lieu de résidence, Fujita (1989) à la suite d'Alonso (1964), introduit le concept de fonction d'enchère. La fonction d'enchère décrit le consentement à payer d'un ménage par unité de logement localisé en x et pour un niveau d'utilité fixé. Ainsi $\Psi(x,u)$ est le prix maximum par unité de taille du logement qu'un ménage peut payer pour résider dans la localisation x et obtenir un niveau d'utilité u .

Ainsi

$$\Psi(x,u) = \max_{z,s} \left\{ \frac{Y^o - G(x) - T(x)}{s} \mid U(z,s,E(x)) \right\} \quad (2-109)$$

La fonction d'enchère est obtenue quand $(Y^o - G(x) - T(x) - z)/s$ est maximisé par le choix de la consommation (z,s) pour un niveau d'utilité u . C'est-à-dire que les dépenses consacrées au logement sont maximisées pour un niveau d'utilité u et un panier de consommation (z,s) . A partir de ce modèle, on peut montrer que lors d'une variation de l'accessibilité, qui a pour conséquence de réduire le revenu net des coûts de transport, les ménages ne peuvent conserver leur niveau d'utilité qu'à la condition que le coût du logement soit réduit. L'étude d'une variation du niveau d'aménités peut être intéressante. Supposons une augmentation du niveau d'aménités, $E_2 > E_1$, *ceteris paribus*. On peut alors montrer que la courbe d'indifférence se déplace vers le bas, affichant un niveau d'utilité identique. Ceci signifie que dans un meilleur environnement, la même utilité peut être atteinte avec un plus petit montant de bien composite. La fonction d'enchère augmente avec l'accroissement de la qualité de l'environnement. Par conséquent, les ménages peuvent enchérir de manière plus importante dans un environnement meilleur.

4222. L'interprétation en termes de capitalisation

Ainsi, dans le modèle avec aménités, le comportement des ménages en termes de choix de localisation résidentielle consiste à arbitrer entre localisation (distance au centre et aménités) et choix du type de logement. La fonction d'enchère reflète ces arbitrages. L'offre de bien public local peut alors modifier les aménités ou l'accessibilité de certaines localisations. Aussi, les ménages vont-ils changer les fonctions d'enchère correspondant à ces localisations pour répondre à ces modifications. Indirectement, ils révèlent par leur fonction d'enchère leurs préférences pour les biens publics locaux. Beckerich (1997) illustre ces arbitrages en prenant l'exemple des transports, en particulier la création d'une nouvelle ligne de métro. Celle-ci contribue à modifier l'accessibilité des localisations alentour. Les coûts de transport diminuant, le revenu net pour la consommation du bien

composite et pour le logement est plus important. Ceci conduit les ménages, pour un niveau d'utilité constant, à proposer une enchère supérieure. Cette modification d'enchère illustre l'existence d'une certaine révélation des préférences pour ce bien public local. Cette nouvelle station de métro peut s'accompagner d'une modification du niveau d'aménités qui va également conduire les ménages à revoir leurs enchères. Ainsi, un logement à proximité de la station de métro devrait avoir une valeur supérieure après la création de cette nouvelle offre de transport (si des phénomènes d'anticipation n'existent pas). Cette analyse diachronique permet d'étudier la capitalisation dans les valeurs immobilières résidentielles de cette nouvelle offre de bien public local. De plus, la capitalisation peut être mesurée en comparant, *ceteris paribus*, la valeur des biens immobiliers résidentiels. Le modèle de choix résidentiel montre que deux logements semblables situés à égale distance du centre devraient avoir le même prix. En revanche, la présence de biens publics locaux comme les transports peuvent modifier notamment l'homogénéité de l'accessibilité et le niveau d'aménités à la distance x du centre et ainsi provoquer des modifications des prix de l'immobilier résidentiel. A l'équilibre du marché foncier, la différence de prix entre deux biens fonciers identiques sauf pour ce qui est de la proximité de biens publics locaux est égale à la valeur de la différence d'accessibilité à ce bien public, qui peut être le réseau de transport. On dit que les prix fonciers et immobiliers capitalisent la valeur du bien public qu'est le réseau.

La capitalisation immobilière de l'offre de biens publics locaux peut ainsi être définie comme le reflet dans les prix immobiliers de la proximité, de la nature, du niveau d'offre de biens publics locaux. Cette approche permet de mesurer par l'intermédiaire des enchères des ménages pour les biens immobiliers, les variations d'utilité collective provoquées par l'offre de bien public local. La capitalisation immobilière consiste en un mécanisme de révélation des préférences des ménages pour les biens publics locaux. Implicitement, cela suppose que d'une part, l'offre de biens publics provoque des distorsions sur les différents marchés. Il en résulte un équilibre différent de la situation de ces marchés lorsque les biens publics et leurs externalités ne sont pas présents. Cela a des conséquences sur les prix du sol et sur la valeur des biens immobiliers. D'autre part, des effets redistributifs de l'offre de biens publics locaux existent. En effet, les biens publics locaux (BPL) ne bénéficient pas à tous les habitants dans la même intensité et dans le même sens. Un BPL est un bien localisé dont la consommation et les externalités en résultant relèvent d'une certaine proximité géographique. Cette proximité géographique est conditionnée notamment par le paiement de rentes foncières.

Dans le champ d'application des transports, des travaux ont été développés notamment sur la capitalisation des gains d'accessibilité (Bajic, 1983 ; McDonald et Osuji, 1995 ; Forest *et alii*, 1996 ; Anas, 1995). Ces études montrent que l'existence d'une capitalisation intracommunale de l'offre de transport ne peut pas être rejetée et qu'il existe des phénomènes d'anticipations de l'offre de transport. Pourtant, elles demeurent peu nombreuses eu égard à celles concernant la capitalisation intercommunale de l'offre de BPL.

4223. Les préférences spatiales des ménages et localisation résidentielle : l'approche de Richardson (1977) et de Papageorgiou (1973)

Certaines études foncières menées dans les années 60 et 70 ont montré qu'il existe des variations importantes du gradient de rente foncière en fonction de la distance (existence de gradients de prix du sol positifs) ce qui nous éloigne du schéma classique de décroissance de la rente à un taux relatif constant issu de l'introduction de la seule rente de localisation. Partant de là, Richardson (1977) met en avant le concept de « rentes d'externalités ». Il se place dans le cadre de base de la Nouvelle Economie Urbaine, en supposant qu'il existe une rente de localisation décroissante avec la distance au centre. Il avance alors que la seule solution pour expliquer des gradients de prix du sol positifs est d'introduire d'autres éléments dans la détermination de la rente foncière. Il s'agit ainsi des rentes d'externalités que Richardson associe avec les faibles densités pour lesquelles les ménages peuvent avoir des préférences. Dans le modèle de base, la densité diminue quand on s'éloigne du centre. Les rentes d'externalités sont donc croissantes avec la distance, à des taux qui peuvent être supérieurs au taux de décroissance de la rente de localisation. Ainsi, il montre qu'il peut exister des gradients de rente foncière positifs à l'équilibre : si les gains sur les coûts de transport et la dépense de logements procurés par un rapprochement du centre ne sont pas compensés par la désutilité associée avec les fortes densités, les ménages ne sont pas amenés à se relocaliser vers le centre. Cette analyse concilie donc une rente de localisation et une rente ricardienne liée aux caractéristiques des lieux. En choisissant comme externalités positives les faibles densités, Richardson montre que, pour que la rente totale soit croissante, il faut que l'utilité marginale procurée par les faibles densités soit supérieure à l'utilité marginale de la quantité d'espace consommée par le ménage. En effet, si ce n'était pas le cas, le ménage pourrait, en se rapprochant du centre, consommer davantage de logement dont le prix unitaire a diminué, et donc accroître son utilité ; le gain d'utilité que cela lui procurerait ne serait pas oblitéré par la diminution d'utilité générée par l'augmentation des densités.

Cet exemple nous indique de façon intéressante quel impact l'environnement peut avoir sur les choix de localisation des ménages : on peut envisager que la quantité d'espace consommée par les autres ménages - c'est ce que détermine les densités - compte autant, si ce n'est plus, dans les choix de localisation des ménages que leur propre consommation d'espace. Les ménages recherchant l'abondance d'espace n'ont pas de raison de se localiser dans un endroit densément peuplé, même s'ils ont la possibilité financière de supporter les prix du sol élevés générés par les fortes densités. Leur consommation d'espace n'est pas le seul critère déterminant leur niveau d'utilité : c'est aussi l'espace consommé par les autres ménages qui va satisfaire leur besoin d'abondance d'espace, en les protégeant des utilisations intensives que pourraient en faire d'autres agents n'ayant pas les mêmes préférences.

Papageorgiou (1973) pose la question des préférences spatiales en rapport avec la qualité de l'environnement. On peut considérer que la qualité de l'environnement, qui est une variable spatialisée, est introduite dans le modèle de base par l'intermédiaire de la préférence pour l'abondance d'espace qui y est liée. Cependant, Papageorgiou juge utile d'inclure explicitement l'impact de la qualité de l'environnement sur les valeurs foncières et la distribution spatiale de la population. La qualité de l'environnement est liée à la présence d'attributs des lieux qui peuvent avoir un effet tant positif (les aménités) que négatif (les nuisances) et qui peuvent ou non présenter des répartitions spatiales liées à la

structure de l'économie urbaine. Il considère alors un modèle dans lequel l'utilité des ménages est fonction de l'abondance d'espace, des loisirs et de la qualité de l'environnement. Deux types de facteurs influencent la qualité de l'environnement : certains correspondent à des variables endogènes au modèle, comme la congestion ou la proximité de centres économiques, d'autres sont exogènes, comme certaines caractéristiques physiques tels que le paysage ou le climat.

La théorie micro-économique urbaine fournit un cadre d'analyse pertinent pour l'étude des comportements des agents économiques dans la ville. Bien que les hypothèses de travail soient relativement simplistes, ces modèles permettent d'apporter des éclairages essentiels sur la compréhension des comportements des agents économiques dans la ville, sur les déterminants du choix de localisation des ménages, sur le rôle du transport sur les formes urbaines. Ils permettent ainsi de tirer certaines conclusions sur les mécanismes d'interaction entre transport et urbanisation. Par ailleurs, les principes mis en oeuvre dans cette approche sont très souvent utilisés dans les modèles dont la visée est plus opérationnelle. C'est le cas, par exemple, de nombreux modèles de programmation linéaire (cf. § 32). La théorie micro-économique urbaine est notamment la clé de voûte des modèles plus récemment développés de choix discret de localisation (cf. section 5). Ces modèles sont cependant des modèles statiques, des modèles d'optimisation. Bien que s'inspirant des principaux résultats de cette analyse, notre modèle ne saurait cependant être construit dans cette logique dans la mesure où il doit répondre à une problématique de prévision du système de déplacements, de simulation de politiques de transport.

Section 5. Les modèles de choix discrets de localisation fondés sur la théorie de l'utilité aléatoire

Une nouvelle génération de modèles urbains incorporant des hypothèses économiques sur le comportements des acteurs a vu le jour à la suite des travaux sur la théorie des fonctions d'utilité aléatoire et des choix discrets (Anas, 1986 ; Batty, 1994 ; Wegener, 1994). A ce jour, ces modèles offrent de bonnes performances dans le domaine de la prévision de la demande en transport, mais ils sont encore très perfectibles en ce qui concerne les liens entre le fonctionnement de l'économie d'une ville et la configuration de son espace.

51. Une approche alternative au modèle d'Alonso

Depuis les travaux d'Alonso (1964) sur la théorie de la localisation urbaine des ménages, l'idée d'un marché foncier se comportant comme un processus d'enchères a été envisagée comme l'approche la plus pertinente. Cette version a été à l'origine, comme nous l'avons présentée précédemment, développée sous une forme déterministe et pour une ville monocentrique. Une approche alternative a été proposée par McFadden (1978) et Anas (1982) fondée sur la théorie de l'utilité aléatoire (Domencich, McFadden, 1975). Cette approche conduit, le plus souvent, à générer des modèles de spécification logit, qu'ils soient multinomiaux ou encore hiérarchiques.

L'approche des modèles de choix discrets de localisation vise à donner un contenu plus réaliste aux modèles micro-économiques urbains. En effet, la nature des hypothèses simplificatrices de ces modèles, leur représentation mathématique et les difficultés opérationnelles qu'ils posent, les restreignent à des propositions théoriques, ne procurant pas d'outils très utiles aux planificateurs. De la Barra (1989) présentent les principaux défauts de cette approche :

1.
Les consommateurs et les producteurs sont supposés disposer d'une information parfaite sur les conditions du marché. Une information limitée devrait être une hypothèse plus réaliste.
2.
Les demandeurs et les offreurs ont une mobilité à faible coût et ils peuvent apparaître et disparaître sans coûts.
3.
Les demandeurs et les offreurs sont supposés disposer de fonctions d'utilité déterministe. Confrontés aux mêmes circonstances, ils choisiront toujours la même option.
4.
Ces modèles ont une approche trop agrégée (on raisonne sur un individu moyen).

L'approche du choix de localisation résidentielle en termes de choix discrets tente de pallier ces défauts. Ces modèles s'inscrivent dans la lignée des modèles probabilistes. La formulation probabiliste permet à la fois d'envisager des localisations discrètes et de prendre en compte l'existence de différences quant aux préférences individuelles grâce à une fonction d'utilité aléatoire. La représentation des choix de localisation résidentielle par l'approche des choix discrets peut être résumée comme suit. Un individu doit choisir une zone de localisation résidentielle parmi l'ensemble L . L'individu attribue à chaque localisation une fonction d'utilité. Celle-ci est définie en fonction des attributs de la zone résidentielle. A l'instar de Lancaster (1966), l'approche en termes de choix discrets définit l'utilité en fonction des propriétés et des caractéristiques des biens, nommés attributs du logement ou de la zone résidentielle. Le logement peut être considéré comme un bien qui outre ses caractéristiques propres, donne accès à un certain nombre de biens localisés qui font alors partie du bien logement. Ainsi, généralement décrit comme un panier, le bien résidentiel est effectivement composé d'éléments structurels (taille, forme, nombre de pièces, type de chauffage, *etc.*), d'éléments relatifs à sa localisation (accessibilité générale) et d'éléments d'environnement immédiat (composition sociale du quartier, voisinage, *etc.*) ou d'environnement institutionnel (offre de biens d'équipements, politique municipale, *etc.*), d'environnement naturel (présence d'espace vert, *etc.*). On doit se demander quelle échelle considérer pour tenir compte de la présence de ces différentes caractéristiques. Les équipements ne sont jamais disponibles à la localisation même du logement, mais sont plus ou moins proches. Hormis le paysage ou un air non pollué, qu'on peut consommer depuis sa fenêtre, les attributs des lieux correspondent en fait à des accessibilités à certaines caractéristiques, à une échelle qui est différente de

l'accessibilité au centre. Ainsi, le logement ou la zone résidentielle, est envisagé comme un ensemble de services, et les ménages, étant des agents rationnels à la recherche de la plus grande satisfaction, fondent leur fonction d'utilité sur les attributs de cette zone. L'individu compare ces différentes utilités et sélectionne la localisation qui offre la plus forte utilité. Afin de prendre en compte la variabilité dans les comportements individuels, les utilités sont spécifiées comme des variables aléatoires de telle sorte que le choix est probabiliste (De Palma, Lefèvre, 1985). L'utilité de l'agent face à une alternative comprend deux composantes : une composante déterministe, considérant d'une part les attributs du logement ou de la zone résidentielle et d'autre part des caractéristiques du décideur (par exemple revenu, profession, etc.) et une composante aléatoire, comprenant les éléments de subjectivité de chaque décideur et des erreurs d'évaluation dues à un manque d'information ou à la rationalité limitée dans laquelle il effectue ses choix. En d'autres termes, pour le décideur n , l'utilité du choix de l'alternative i se définit par :

$$U_{ni} = V_{ni} + e_{ni}$$

où U est l'utilité totale, V sa part déterministe qui est égale pour tous les décideurs de la même classe relativement au choix i et e est le terme aléatoire. La probabilité que le décideur n choisisse i est donnée par :

$$P_{ni} = \Pr\{U_{ni} > U_{nj}\}$$

$$P_{ni} = \Pr\{V_{ni} + e_{ni} > V_{nj} + e_{nj}\}, \quad \rightarrow \quad \rightarrow \quad \forall i \neq j$$

c'est-à-dire la probabilité que l'utilité relative soit supérieure à celle de n'importe quelle autre décision. Telle est l'équation fondamentale de tous les modèles d'utilité aléatoire dans la mesure où, supposant une certaine distribution des termes aléatoires et des termes connus V , il devient possible de calculer la probabilité de choix d'une alternative. Ces hypothèses permettent de prévoir les comportements des décideurs. On part, en effet, d'une base empirique représentée par les choix des N décideurs confrontés à un ensemble d'alternatives A , et d'un ensemble de variables explicatives X , caractéristiques des décideurs, qui influent sur les termes V de leurs fonctions d'utilité et donc sur les choix des décideurs eux-mêmes. Les hypothèses de la théorie de l'utilité aléatoire permettent de construire un modèle qui représente logiquement ces processus de décision et qui selon les hypothèses relatives à la distribution des termes aléatoires, peut être estimé économétriquement.

Cette démarche théorique peut être illustrée par la présentation d'un modèle de choix de localisation résidentielle proposé par de Palma et Lefèvre (1985).

52. Un modèle dynamique de choix de localisation résidentielle : le modèle de de Palma et Lefèvre (1985)

Dans ce modèle, la théorie du comportement économique de choix est appliquée afin de construire un modèle dynamique de changement résidentiel à l'échelle du voisinage. A chaque instant, chaque individu peut choisir parmi L différentes zones et un

sous-ensemble supplémentaire, appelé le monde extérieur (reste du monde). S'il décide de réviser son choix actuel, il attribue dans un premier temps à chaque localisation une fonction d'utilité dépendant des prix d'investissement et des décisions d'entretien, il compare ces différentes utilités et enfin, sélectionne la localisation qui offre la plus forte utilité. Afin de prendre en compte la variabilité dans les comportements individuels, les utilités sont spécifiées comme des variables aléatoires de telle sorte que le choix est probabiliste. Les auteurs adoptent une forme spécifique bien connue pour les choix probabilistes, appelée la formule logit multinomiale.

Le modèle considère une population fermée et homogène. Considérons une population de N individus qui sont face à une décision de localisation résidentielle. Le marché des logements est subdivisé en L zones, indexée de $i=1..L$, qui représentent des ensembles d'unités de logements homogènes, ainsi qu'un sous-ensemble additionnel, appelé le reste du monde et indexé $i=L+1$, qui permet de considérer les immigrations et les émigrations. Un système d'équations différentielles est établi afin de déterminer les transitions résidentielles. On pose $n_i(t)$, $1 \leq i \leq L+1$, le nombre d'individus qui choisit d'habiter dans la zone i au temps t . Le choix d'un changement résidentiel s'effectue en deux temps. Dans un premier temps, l'individu prend la décision de se délocaliser. On définit par R , le taux de révision résidentiel individuel par unité de temps. Dans un deuxième temps, l'individu fait le choix de la zone résidentielle. On définit par $p(i)$, $1 \leq i \leq L+1$, la probabilité qu'une fois que la décision de révision est prise, un individu décide de sélectionner la zone i .

Sans présence de coûts de transaction à la délocalisation, la quantité $R[Np(i) - n_i(t)]$ peut être considérée comme une mesure du déséquilibre en i au temps t . On peut montrer que le taux de changement résidentiel $dn_i(t) / dt$ est précisément égal à cette quantité :

$$dn_i(t) / dt = R[Np(i) - n_i(t)] \quad (2-110)$$

Comme la population est fermée, l'état du système peut être décrit avec uniquement L des $L+1$ variables $n_i(t)$. Il reste à modéliser les choix de probabilités $p(i)$. Ces choix sont modélisés selon les principes de la théorie classique de maximisation de l'utilité du consommateur économique de la façon suivante. On suppose qu'un individu qui révisé son choix actuel assigne à chaque localisation une valeur d'une fonction objectif, appelée utilité, et sélectionne la localisation qui offre le maximum d'utilité. L'utilité de la localisation i est considérée comme étant la somme d'une utilité moyenne, ou systématique, utilité $V(i)$ et une variable aléatoire représentant les différences dans les préférences parmi les individus. Ainsi, les choix individuels sont probabilistiques et l'expression de $p(i)$ est déterminée à partir de la distribution des éléments aléatoires de l'utilité. Ici, $p(i)$ est spécifiée par la forme standard logit multinomiale.

$$p(i) = \exp \left[\frac{V(i)}{\sum_{j=1}^{L+1} \exp V(j)} \right] \quad 1 \leq i \leq L+1 \quad (2-111)$$

Dans ce modèle, l'utilité $V(i)$ dépend des prix des investisseurs et des décisions d'entretien et de quelques autres attributs locaux tels que l'accessibilité aux lieux d'emplois et d'achat, et la disponibilité des services publics.

Les auteurs examinent deux cas concernant la détermination de l'utilité. Dans le premier cas, les politiques de prix et d'entretien sont fixées *a priori* et ces politiques aussi bien que d'autres attributs locaux demeurent constants sur la période. P_i est donc fixé et il est clair que chaque utilité $V(i)$ peut être envisagée comme une variable exogène. Les utilités $V(i)$ sont alors exprimées sous une forme additivement séparable, de forme linéaire dans les paramètres (Domencich, McFadden, 1975). On suppose ici que chaque zone i , $V(i)$ peut être écrite comme suit :

$$V(i) = \alpha_i - \beta P_i \quad 1 \leq i \leq L, \quad (2-112)$$

où P_i représente le prix du logement fixé en i ,

α_i est l'ensemble des attributs locaux caractérisant la localisation,

et $\beta > 0$ est un coefficient mesurant la sensibilité individuelle au prix,

P_i et α_i sont considérés comme des facteurs exogènes.

Dans le deuxième cas, l'utilité d'une zone est envisagée comme une variable endogène. En effet, un certain nombre d'auteurs ont souligné, en particulier, que la qualité des zones dépendait directement ou non, du nombre d'individus vivant dans celle-ci (Lerman (1975), Ben-Akiva *et al.* (1980), Weidlich et Haag (1980), Miyao (1981)). De Palma et Lefèvre transposent cette idée dans leur modèle et considèrent à présent que l'utilité d'une zone comme une variable endogène dépendant d'une façon spécifique des comportements de choix individuels. Ainsi, la fonction de l'utilité est modifiée en introduisant explicitement la notion de qualité de logement.

$$V(i) = \alpha + q - \beta P \quad (2-113)$$

où P et β ont les mêmes significations que précédemment, q représente la qualité du logement et α les autres attributs locaux. Très souvent, les prix et la qualité des logements ne sont pas constants mais étroitement liés et évoluent dans le temps. Ici, on considère que le prix P s'ajuste immédiatement à une modification de la qualité q . Pour estimer de quelle façon P dépend de q , les auteurs introduisent le concept d'attractivité énoncé par Ben-Akiva et Lerman (1979).

Par la suite, le modèle suppose que les L zones sont gérées par un seul et même agent économique, un agent privé ou une agence d'investissement par exemple. L'objectif pour le monopoleur est de maximiser une fonction objectif qui est,

généralement, une combinaison de son profit et du surplus du consommateur. Pour simplifier, il est supposé que cet agent économique est seulement concerné par le problème de la fixation des prix des logements afin de maximiser son profit dans un état stable. Il est également supposé qu'il n'y a pas de contraintes sur les stocks du marché de logement et pas de coûts spécifiques associés aux logements vacants. Le problème de la décision pour un monopoleur est alors réduit à celui de la détermination des prix P_i qui maximisent sa fonction de profit.

Conclusion du chapitre 2

Les relations entre le transport et l'occupation des sols ont été largement envisagées d'un point de vue théorique. Ces relations sont nombreuses et complexes. Les modèles ne considèrent qu'un type d'interaction, et bien souvent c'est l'interface entre mobilité quotidienne et stratégie de localisation résidentielle des ménages qui est privilégiée.

Les diverses traditions de modélisation présentées dans ce chapitre donnent différents éclairages sur les mécanismes à l'oeuvre dans l'interaction transport-urbanisation. Deux notions sont récurrentes dans ce questionnement : la notion d'interaction spatiale et celle d'accessibilité. Les modèles présentés ne fournissent pas des outils opérationnels satisfaisants pour diverses raisons. Soit parce que leurs fondements théoriques sont pauvres et ne peuvent retranscrire les comportements (cas des modèles généraux de transport et d'occupation des sols), soit parce qu'ils sont trop lourds à manipuler (c'est le cas des modèles de programmation linéaires par exemple), soient encore parce qu'ils reposent sur des hypothèses trop simplificatrices de représentation de la ville (c'est le cas des modèles micro-économiques urbains), soit enfin parce qu'ils n'envisagent pas suffisamment la complexité du fonctionnement du système de transport.

Les modèles interactifs de transport et d'urbanisation tentent de pallier ces défauts. Ils visent à expliquer à la fois l'utilisation des sols et les flux de transport, et sont calés sur des situations réelles.

Chapitre 3. Les modèles interactifs de transport et d'urbanisation : une revue méthodologique

Introduction

Pendant ces trois dernières décennies, la modélisation du transport urbain a progressivement incorporé et unifié les différentes théories et méthodes aboutissant à une structure plus cohérente et reflétant une compréhension plus approfondie de la situation réelle. L'émergence des modèles interactifs transport-urbanisation représente le point culminant des efforts menés ces dernières années. L'objet de ce chapitre est dans un

premier temps de rappeler ce qui a amené les chercheurs à élaborer des modèles interactifs de transport et d'urbanisation et de présenter un rapide historique de ces recherches (section 1). Les principales caractéristiques de ces modèles sont présentées par la suite (section 2). D'ores et déjà, certaines évaluations ont été menées sur des modèles existants et sont à même de dégager certains enseignements concernant ces études (section 3). Enfin, deux modèles interactifs particuliers sont présentés (section 4).

Section 1. Nécessité et développement des modèles interactifs

11. Nécessité de l'élaboration des modèles interactifs

L'élaboration de modèles interactifs de transport et d'occupation des sols est devenue une nécessité afin de répondre aux besoins d'évaluation des politiques de transport dans un horizon de long terme. En effet, l'insuffisance de l'approche traditionnelle de la modélisation de la demande de déplacement conduisant à ignorer l'interaction entre transport et occupation des sols a été largement soulignée. Les raisons qui ont conduit à l'élaboration des modèles interactifs de transport et d'occupation des sols sont alors rappelées. Ces modèles ont comme objectif de répondre à la double question fondatrice de la prospective des transports urbains (Bieber, Massot, Orfeuil, 1992) : d'une part, comment l'urbanisation transforme la mobilité ?, et d'autre part, comment la mobilité transforme l'urbanisation ?

111. La remise en cause de l'approche dichotomique

L'analyse du développement des villes a été une des plus grandes préoccupations des sciences sociales de ce siècle. Wilson souligne que l'enjeu principal était la compréhension des mécanismes d'interaction entre l'occupation des sols et le transport. « *The heart of the task is to understand transport/land-use interaction, which are obviously highly complex* » (Wilson, 1998). Les relations transport-occupation des sols ne sont pas l'unique clé permettant de comprendre la nature et l'évolution des formes urbaines, mais ont des implications majeures en matière de politiques urbaines. Les investissements en transport sont parmi les investissements publics les plus conséquents. Leurs effets doivent donc être correctement évalués. Cependant, la planification urbaine et la planification des transports ont été menées comme deux disciplines disjointes, subissant le contrôle d'organismes différents et étant alimentées par des approches disciplinaires et/ou théoriques relativement distinctes. En effet, un plan de transport urbain est mis au point en s'appuyant sur certaines hypothèses concernant l'évolution des activités urbaines et plus particulièrement celles de l'emploi et de la population. Ces prévisions ont en général un caractère fixe pendant toute la période prévisionnelle. On ne tient donc pas compte du fait que la construction des infrastructures de transport s'effectue en plusieurs étapes et que pendant ce temps, les activités vont pouvoir se déployer en anticipant sur les avantages résultant de la réalisation du plan. De la même façon, un schéma d'urbanisme va postuler un réseau de transport invariable pendant toute la période de prévision. On ignore ainsi l'impact de l'implantation des activités sur le système de transport, les effets de congestion éventuellement produits par celles-ci et l'action en

retour que peuvent avoir les difficultés de circulation sur l'implantation des activités. Considérer isolément la politique d'utilisation du sol et de transport et n'adopter qu'une approche à court terme a conduit à l'élaboration de politiques, qui ont certes parfois permis de gérer les problèmes dans l'urgence et de façon ponctuelle, mais à long terme ont eu des effets aggravants. Du point de vue des approches analytiques, nous l'avons vu, chaque discipline considère l'autre système comme donné. L'analyse de la demande de transport ne se préoccupe pas des choix de localisations qui pourtant conditionnent les schémas spatiaux des déplacements. En revanche, les analyses en matière de localisation, bien que donnant souvent une place centrale au transport, considèrent le système de transport comme exogène et ne le prennent en compte que de manière relativement fruste.

112. La nécessaire prise en compte de l'interdépendance de l'occupation des sols et du transport

L'influence du développement urbain sur les moyens de transport est un processus largement admis. Depuis les années 60, les plans de transport ont été influencés par l'idée que les équipements en matière de transport doivent être adaptés à l'utilisation des sols. Toutefois, la perspective de l'interaction entre l'occupation des sols et les transports s'est élargie depuis que Lowry (1964) a postulé que les équipements de transport conditionnent eux-mêmes l'utilisation des sols. Pourtant, l'idée d'une interaction entre l'utilisation des sols et les transports ne s'est introduite qu'assez lentement dans les études de planification.

Il apparaît que les changements que connaissent les villes ont d'importantes incidences sur les déplacements et l'offre de transport, lesquels affectent à leur tour la façon dont les villes évoluent. L'évolution de la structure urbaine a une incidence sur les transports. "Il est important de tenir compte du fait que les évolutions en matière de transport ne sont pas seulement le produit des choix effectués par les individus sur la manière de se rendre d'un point de départ A à un point d'arrivée B. La structure des origines et des destinations change elle-même constamment et exerce une forte influence sur les déplacements effectués et les modes choisis et par conséquent sur les évolutions elles-mêmes" (Webster, 1985). La demande de déplacement est une demande dérivée, intermédiaire. Les besoins de déplacements naissent des besoins d'échanges des individus dans la ville et du fait de la dispersion des lieux d'activités à travers la ville. Si les structures urbaines viennent à changer (c'est le cas avec le mouvement de périurbanisation), la demande de déplacement s'en trouve modifiée. Les interactions entre le développement urbain, qui détermine la structure des origines et des destinations des déplacements, et les transports jouent dans les deux sens. Dans la mesure où les décisions de localisation effectuées par les acteurs urbains sont en partie déterminées par les coûts relatifs de transport, des changements dans le fonctionnement du système de transport peuvent avoir, à long terme, des effets sur la structure des localisations des individus. Le système de la localisation des activités et celui des transports ne peuvent être considérés comme isolés. Si l'influence des structures urbaines sur la demande de déplacements est largement acceptée et modélisée, c'est parce que cet effet est de nature immédiate et relativement mécanique. En revanche, l'influence des transports sur

la localisation des individus et des activités et plus généralement sur les formes urbaines n'est pas entièrement reconnue. En effet, si l'on reconnaît son rôle non négligeable sur l'évolution des formes urbaines, cette action ne présente pas un caractère automatique et univoque et ne peut s'observer que sur un horizon de long terme.

Il ressort que l'évolution future des déplacements doit être envisagée en considérant les tendances socio-économiques lourdes affectant la mobilité des agents, le développement des différents réseaux de transport, mais aussi en considérant les rétroactions potentielles sur le système d'occupation des sols. Parce que ces interactions sont extrêmement complexes, la seule façon pratique d'évaluer les impacts des politiques est d'utiliser un modèle mathématique basé sur une compréhension approfondie des mécanismes à l'oeuvre. C'est l'objet des modèles interactifs de transport et de localisation¹².

113. Le besoin d'un outil de planification opérationnel de long terme

Les approches analytiques micro-économiques apportent des enseignements précieux sur la nature du lien transport-urbanisation. Cependant, ces modèles ne visent pas l'opérationnalité. Des besoins d'outils de planification de long terme se sont manifestés depuis quelques années (cf. Chapitre introductif), notamment sous l'effet de la montée des problèmes liés aux dysfonctionnements urbains, l'émergence de la problématique de la mobilité durable, et la préoccupation des externalités négatives urbaines. Ainsi, le développement de ce type de modélisation s'explique en partie par l'existence d'une demande sociale de la part des autorités publiques.

Un certain nombre de leviers sont à la disposition des planificateurs pour gérer les problèmes urbains. Cela inclut les investissements en nouvelles infrastructures, les mesures de régulation du trafic, les politiques fiscales aussi bien que d'autres mesures de politiques agissant sur l'usage des sols. Les planificateurs doivent prendre en compte l'ensemble des répercussions résultant des mesures prises et des possibilités d'inversion des effets attendus dans un horizon de long terme. Seul un modèle s'appuyant sur une approche globalisante et systémique du fonctionnement de la ville est susceptible de fournir une évaluation pertinente des effets des politiques de planification à long terme.

12. Développement des modèles interactifs

La relation entre la localisation des activités et le système de transport est discutée depuis de nombreuses années, mais ce n'est que récemment que l'on a cherché à formaliser le problème.

La recherche sur les modèles d'interaction entre transport et localisation est relativement récente. Elle s'est particulièrement développée dans les pays anglo-saxons, ainsi que dans des pays plus interventionnistes comme la Suède, ou dans les pays où les problèmes urbains sont de telles ampleurs (du fait du surpeuplement, comme au Japon) qu'ils poussent à la recherche de la mise au point de modèles d'aide à la décision. Roy et

¹² Ces modèles sont également nommés « modèles intégrés de transport et d'occupation des sols ». Nous emploierons ces deux nominations de façon indifférente.

alii (1996) estiment que c'est immédiatement après la crise énergétique de 1973 que l'on a vu un accroissement de l'intérêt porté sur ce type de modèles. Pour ces auteurs, la maîtrise des systèmes urbains passent par une meilleure connaissance des mécanismes d'interaction entre transport et urbanisation. Les systèmes urbains sont des systèmes complexes, et un modèle mathématique qui cherche à prévoir les comportements spatiaux d'un tel système doit rendre compte des mécanismes d'interaction, clé de la détermination du développement de long terme.

Ce mouvement s'est développé de façon dispersée sous l'impulsion de quelques chercheurs dont les projets étaient soutenus par quelques villes ou collectivités locales. Néanmoins, des tentatives de restitution du fonctionnement global de la ville se sont développées relativement tôt avec notamment les modèles dits « large scale » ou « modèles généraux d'urbanisation ». En effet, l'idée qu'un modèle mathématisé et informatisé de transport et d'occupation des sols pouvait contribuer à une planification plus rationnelle de la ville est née dans les années 50 et a culminé dans les années 60. Ainsi, le modèle de Lowry (1964) (cf. Chapitre 2) peut être envisagé comme le père fondateur des modèles interactifs de transport et d'occupation des sols. Puis, dans les années 70, on voit apparaître la première génération de modèles combinés de transport et d'occupation des sols. Les travaux les plus importants de cette première génération sont ceux de Wilson et *alii* (1969, 1971, 1972) nommé SELNEC, ceux de Putman (1973) et Echnique et *alii* (1973). Ces modèles avaient l'ambition de rendre compréhensible autant que possible les mécanismes imbriqués du développement urbain, et ainsi d'être des instruments permettant de mieux prévoir et contrôler le développement des villes.

Cependant, ce n'est que depuis les années 80 que les modèles interactifs se sont particulièrement déployés. Leur développement représente la reconnaissance croissante des connexions complexes entre l'urbanisation et le système de transport et le besoin de modéliser ces systèmes d'une façon entièrement intégrée.

Section 2. Les principes et caractéristiques des modèles interactifs de transport et de localisation

21. Les principes généraux des modèles interactifs de transport et d'occupation des sols

L'originalité essentielle de ces modèles est de souligner l'importance dans le processus de planification est l'introduction des interactions entre le transport et l'occupation des sols. Parce que ces interactions sont extrêmement complexes, ces modèles postulent que la seule façon pratique d'évaluer les impacts des politiques urbaines est d'utiliser un modèle mathématique basé sur une compréhension approfondie des mécanismes à l'oeuvre.

211. Nature des modèles interactifs

Wegener (1994) indique les grandes propriétés concernant la nature des modèles appartenant à ce champ :

1.

Ce sont des modèles mathématiques dont la visée est opérationnelle. Ils sont destinés à analyser et prévoir le développement des systèmes urbains. Cela exclut les modèles strictement analytiques qui ne peuvent pas se prêter à des tests empiriques.

2.

Ce sont des modèles visant à reproduire un certain niveau de détail c'est-à-dire qu'ils doivent intégrer les processus les plus essentiels présents dans le développement spatial urbain. Cela implique qu'ils doivent inclure au moins la structure des localisations (le mode d'occupation des sols) et le transport. Cela exclut les modèles partiels qui considèrent uniquement des sous-systèmes de façon isolée, comme le système de transport, les systèmes des logements, le système des commerces, etc.

212. Un modèle de modèles urbains

Le modèle interactif est par nature un modèle constitué de sous-modèles urbains. Wegener (1994) distingue huit types de sous-systèmes urbains : les réseaux, le mode d'occupation des sols, les lieux d'emploi, les lieux de résidences, l'emploi, la population, le transport de marchandises et les déplacements de personnes. Un modèle interactif doit au moins prendre en considération deux de ces sous-modèles. Ces sous-systèmes peuvent être ordonnés selon la vitesse à laquelle ils se transforment, c'est-à-dire leur temporalité : du long terme au court terme.

Temporalité de long terme : réseaux, mode d'occupation des sols. Les réseaux urbains tels que le transport, les réseaux de communication, les réseaux sanitaires sont les éléments les plus performants de la structure physique d'une ville. Les projets de grandes infrastructures nécessitent une décennie ou plus, et une fois en place, ils sont continuellement adaptés et réparés mais rarement abandonnés. Le mode d'occupation des sols est relativement stable, il change seulement de façon incrémental et est plus permanent que les constructions individuelles.

Temporalité de moyen terme : l'emploi, la population. Les firmes se créent, périclitent, s'étendent ou se relocalisent en fonction des modifications des marchés et des technologies. Cela crée de nouveaux emplois ou crée des chômeurs et donc affecte l'emploi. De même, les ménages se forment, croissent, déclinent et éventuellement se désagrègent, et à chaque stade de cycle de vie, les ménages ajustent leur consommation de logement et la localisation de leur logement en fonction de leurs besoins. Cela détermine la distribution de la population.

Temporalité de court terme : transport de marchandises, transport de voyageurs. La localisation des activités dans l'espace entraîne une demande d'interaction spatiale qui se matérialise par le transport de marchandises et les déplacements de personnes. Ces interactions sont les phénomènes les plus volatiles du développement urbain spatial.

Wegener introduit également un neuvième sous-système plus global : l'environnement urbain.

La figure 3-1 illustre les principales interactions des neuf sous-systèmes et leurs

multiples liens.

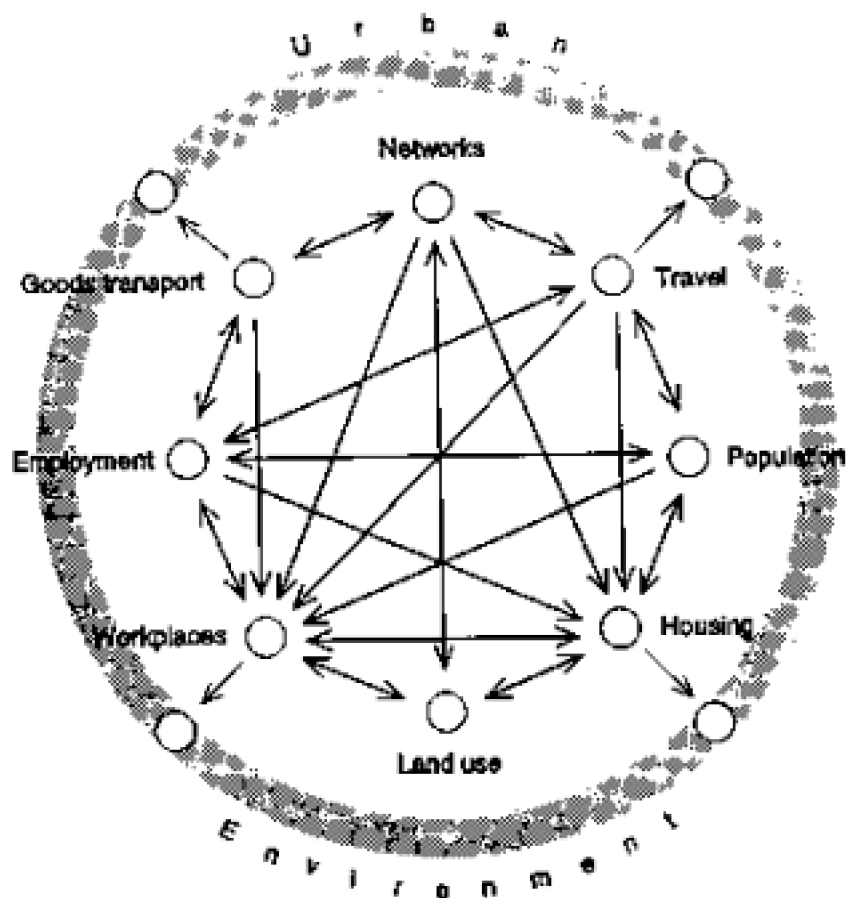


Figure 3-1. Les interactions dans le système urbain

Source : Wegener, « Operational urban models : state of the art », *Journal of the American Planning Association*, vol. 60, n°1, 1994.

213. Conceptualisation de l'interaction transport-urbanisation

Les modèles intégrés s'efforcent de produire un mécanisme à travers lequel les effets indirects causés par le développement d'un sous-système peuvent être transférés comme entrées dans la simulation de l'autre sous-système. Les propriétés essentielles de ces modèles sont de pouvoir modéliser à l'échelle d'une agglomération, les conséquences de diverses politiques de développement de réseaux de transport, de variations des coûts de transport, de politiques de régulation de l'usage des sols, *etc.*, c'est-à-dire d'être des modèles au service de la planification urbaine.

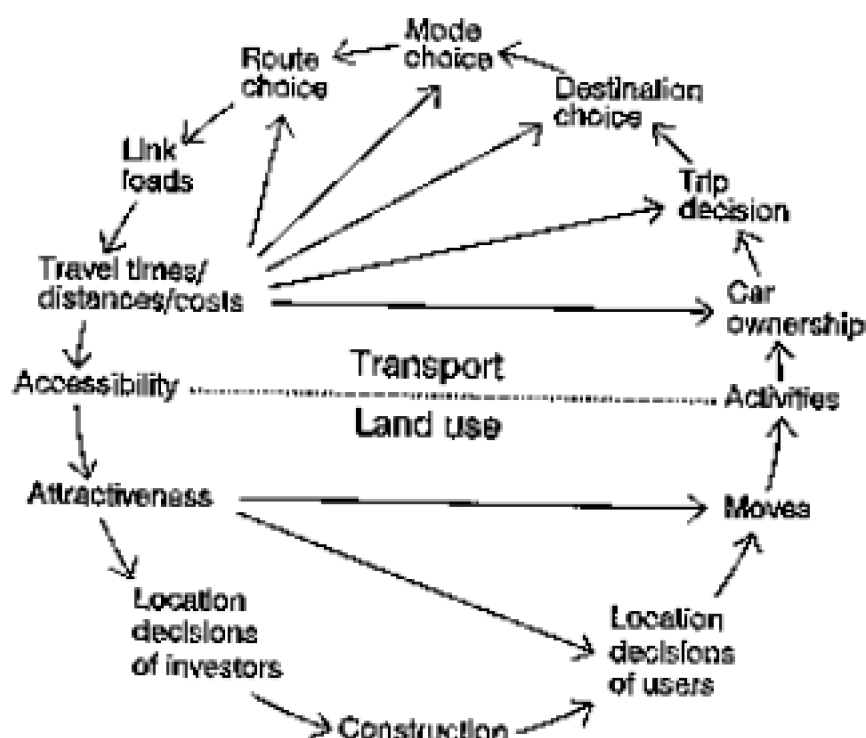


Figure 3-2 - Le cycle d'interaction entre transport et urbanisation

Source : Wegener M. (1996), « Reduction of CO2 emissions of transport by reorganisation of urban activities », in Hayashi Y., Roy J. (Eds), *Transport, land-use and the environment*, Kluwer Academic Publishers, Netherlands, pp.103-124.

La figure ci-dessus représente le « cycle d'interaction du système d'urbanisation et du système de transport » (Wegener, 1996). La distribution des modes d'occupation des sols urbains, telles que les aires résidentielles, industrielles ou commerciales, détermine la localisation des ménages et des entreprises ainsi que les activités humaines qui y sont associées telles que la résidence, le travail, les achats, l'éducation, ou les loisirs. La distribution de ces activités entraîne des interactions spatiales matérialisées par des déplacements. Ces déplacements se réalisent dans les systèmes de transport selon une séquence de choix : des décisions relatives à la possession d'une automobile, au choix de se déplacer ou non, aux choix de la destination, du mode et de l'itinéraire du déplacement. Ces décisions se traduisent par des flux sur les réseaux et par éventuellement des phénomènes de congestion, et des temps, des distances et des coûts de déplacements accrus. Les temps, distances et coûts de déplacements déterminent les conditions de l'accessibilité. Les niveaux d'accessibilité associés à d'autres indicateurs d'attractivité, conditionnent les choix de localisation des investisseurs et celles de nouvelles constructions, de réhabilitation ou de démolition, c'est-à-dire les modifications du système d'urbanisation, qui en retour déterminent les décisions de localisation des résidents et des activités.

Les modèles interactifs de transport et d'occupation des sols se fondent sur le concept que l'interaction des activités dans l'espace induit la demande de transport, en retour, l'accessibilité qui résulte de l'équilibre entre la demande et l'offre de transport

conditionne la façon la localisation des résidents et des activités. Les modèles interactifs comportent généralement une partie « transport », une partie « utilisation des sols » et une partie « développement urbain ». La partie « transport » définit, à système de transports donné, et à localisation des activités et des résidences donnée, les flux de transport et les coûts de transports. C'est l'équilibre du marché des transports. La partie « développement urbain » est en général fondée sur les tableaux entrées-sorties. La procédure la plus fréquemment mise en oeuvre part de l'existence d'une activité dont le niveau est exogène et qui est appelée activité de base ; les autres activités voient leur niveau déterminé par les tableaux entrées-sorties qui fixent les niveaux de production des autres secteurs nécessaires pour assurer le niveau de production, fixé de façon exogène, du secteur de base, ainsi que les niveaux d'emploi nécessaires. La partie « utilisation des sols » détermine les localisations des activités et des individus. C'est à ce niveau que les modèles diffèrent le plus fortement entre eux.

La représentation du système d'occupation des sols est relativement simplifiée et se focalise sur les composants qui interagissent directement avec le système de transport. Les sous-modèles d'occupation des sols ont pour objectif d'expliquer de quelle façon les choix spatiaux sont effectués pour les localisations résidentielles et les emplois. Ils sont, dans l'ensemble, stipulés comme une fonction, parmi d'autres facteurs, de l'accessibilité, qui dépend en retour de l'attractivité zonale et des coûts de transport. La distribution spatiale des résidents et des entreprises est supposée engendrer la majorité de la demande de déplacements, qui conduit le développement du système de transport. L'équilibre entre l'offre et la demande de déplacements détermine les coûts de transport et les conditions d'accessibilité qui alimentent le système d'occupation des sols en influençant la localisation des activités et les flux correspondant. Ainsi, les systèmes d'occupation des sols et de transport sont intégrés à travers le mécanisme de rétroaction entre les deux systèmes. Le système d'urbanisation alimente le système de transport avec les estimations du volume et des localisations des activités génératrices de déplacements. Le système de transport affecte le système d'urbanisation par le biais de la notion d'accessibilité souvent d'une façon temporellement retardée. En effet, dans la plupart des modèles, ce *feed-back* est retardé : les accessibilités de la période 1 affectent les localisations des activités et des individus dans la période 2 (figure 3-3). Ainsi, un changement dans le système de transport, tel qu'une nouvelle route ou un système lourd de transports collectifs, aura un effet immédiat sur la demande de déplacement mais n'affectera le système de localisation et ses interactions seulement une ou plusieurs périodes de temps après.

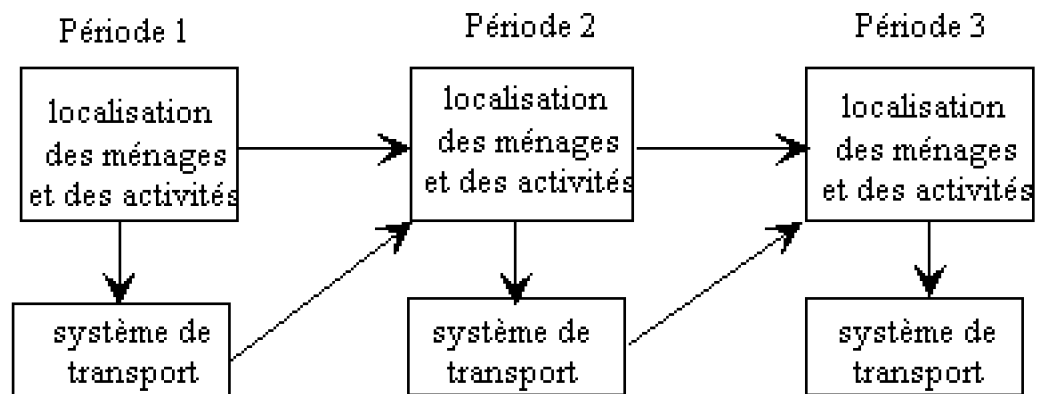


Figure 3-3 - Les relations dynamiques entre le système des transports et le système d'occupation des sols

Source : D'après De la Barra (1996), « Optimising technics in activities-transport models », in HAYASHI Y., ROY J. (Eds), *Transport, land-use and the environment*. Kluwer Academic Publishers, The Netherlands.

214. Une pluralité de modèles interactifs

Depuis les années 70, un grand nombre de modèles intégrés très divers a été élaboré par différentes équipes scientifiques dans différents pays. Le tableau donne une illustration des études réalisées dans ce domaine¹³. Au regard de la diversité des objectifs poursuivis, des bases théoriques employées, des techniques de modélisation utilisées, etc., les modèles intégrés présentent une très grande diversité.

¹³ Cette liste ne prétend pas l'exhaustivité. La date attribuée à chacun des modèles correspondant à l'année du premier développement du modèle. De façon générale, ces modèles ont fait par la suite l'objet de nombreux approfondissements et développements.

Pays	Organisation	Principaux membres	Effet du modèle sur des problèmes de développement
Allemagne	Universitäts-Darmstadt	M. Wegmann	DOTS-GUT (1977)
	Universitäts-Darmstadt	M. Wegmann	DOTM (1980)
Australie	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation, Perth	J.E. Sweeney, B. Sengupta, I.D.	TRIMAT (1980)
	Department of Building Research	M. Taylor, J. Ray, L. Marques, F. Gade	SUSTATM (1986)
	University of South Australia		
Chili	Universitäts-Chile, Santiago	F. Manríquez	S-LUT (1983)
Côte d'Ivoire	Universitäts-Panama	S.H. Rissou	TLUP (1981)
	Universitäts-Tikono, Gbessa	Bayor	BOYCE (1983)
	Mahawaneh University	A. Abo, Duma	CATLAS (1982)
			SYSTEM METROSTIM (1983)
	Chicago	Riss	KIM (1982)
	San Francisco, Bay Area	Moscone	PULL (1981)
	Papa, Gaud, Washington	Wasserman	POCOB (1983)
Grèce	Universitäts-Thessaloniki	G. Christopoulos, M. Pissinou	
Japon	Universitäts-Tokyo, Tokyo	H. Nakamura, Y. Nagata, K. Miyasaka	CACTAS (1985)
	Universitäts-Kyoto	K. Amano, T. Tada, H. Abe	NCARA (1981)
Pays-Bas	Universitäts-Utrecht	H. Flaa	AMERSPORT (1981)
Royaume-Uni	Universitäts-Leeds	R.L. Machen, A. Ludwick	LELT (1990)
	Marshall Exchange & Parsons	M.H. Exchange, A.J. Rowlands, L. Stannard	WEPT (1982)
			WEPLAN (1985)
	Transport & Road Research Laboratory	P.V. Vekins, P.H. Bly, V.J. Poulter	
	University College London	R. Machen	MASTER (1990)
Suède		L. Lundgren	SALOC (1981)
	Royal Institute of Technology	C. Andersson, L.-O. Mattson	TRREL (1981)
		Bayor & Lundgren	TRANSLOC (1987)

Tableau 3-1. Les principaux modèles intégrés développés

22. Principales caractéristiques des modèles intégrés

Il existe un relatif degré d'entente entre les modélisateurs, du moins dans les grandes lignes, et non dans le détail, concernant la nature des mécanismes qui lient les décisions de transport et les décisions de localisation des personnes. Cette sorte de consensus se retrouve dans certaines similarités des différents modèles élaborés, mais néanmoins, l'impression primordiale est une absence d'uniformité et en revanche plutôt une grande diversité. Cette diversité se retrouve à différents niveaux. Elle concerne l'objectif même du modèle (ce qui conditionne par ailleurs son architecture et ses caractéristiques), mais également les bases théoriques sur lesquelles se fondent les modèles, les techniques de modélisation, etc. Les modèles intégrés d'urbanisation et de transport peuvent être classifiés en deux groupes très distincts : les modèles de prévisions et les modèles d'optimisation. Les modèles de prévision sont fondés sur un ensemble de relations comportementales. Ils s'intéressent à l'explication des types de changement des

systèmes de transport et d'urbanisation et à la prévision ou à l'évaluation des impacts d'un changement dans les variables exogènes ou dans les mesures imposées sur ces systèmes. Les modèles d'optimisation ont pour objectif d'établir les grandes lignes de la configuration de l'urbanisation et optimisent un objectif ou un ensemble d'objectifs. Ils sont désignés pour évaluer une politique particulière ou un ensemble de politiques en ce qui concerne ses effets sur la fonction objectif.

221. Les objectifs des modèles

L'aspect le plus fondamental de n'importe quel modèle urbain est l'objectif qu'il vise à atteindre, puisque cela conditionne de nombreuses décisions telles que la méthodologie adoptée, le niveau de détail à introduire, et les accents à positionner sur certaines facettes de la réalité construite. Pour Guittou (1964) « un modèle, c'est une construction simplifiée (...) destinée à expliquer la réalité ou à agir sur elle. Cette construction utilise des données et des variables quantifiables et quantifiées ». Pour Bonnafous (1972) cette définition précise la finalité et les exigences d'un modèle économique. La réalité, que le modèle cherche à expliquer ou à agir sur elle, constitue l'objet du modèle. La formalisation d'une explication ou la définition d'une action constitue son objectif. Ainsi, l'objectif des modèles intégrés peut être très général, il peut consister à expliquer l'essentiel des mécanismes qui déterminent le phénomène urbain. Il peut aussi être plus précis. Par ailleurs, Bonnafous (1972) distingue deux grandes catégories d'objectif : l'objectif d'explication et l'objectif de prévision. Les modèles de simulation de politiques économiques correspondent au deuxième type d'objectif. La simulation des conséquences des décisions susceptibles d'affecter l'aménagement et le développement d'une ville ou d'une région revêt un grand intérêt pratique. Intégrés aux processus de décision, comme outils heuristiques, les modèles de simulation restent un moyen privilégié de connaissance. En particulier, la simulation peut compléter l'intuition et même la remettre en question, en soulevant la possibilité de conséquences contre-intuitives et d'effets pervers.

222. Les types de mesures de politiques à tester

Selon le type de politiques que l'on envisage d'évaluer, le modèle ne sera pas de même nature. Aussi, selon le degré de précision de la mesure envisagée, le modèle va être soit très détaillé, désagrégé, mais il ne pourra prendre convenablement en considération qu'une sous-partie du système. Au contraire, le modèle peut viser à tester des politiques stratégiques, plus globales, le modèle envisagé sera alors de nature plus macroscopique, d'architecture plus stratégique, son objectif sera alors de dégager des grandes tendances. Selon le type de politiques urbaines envisagées, le modèle ne se focalisera pas sur les mêmes facettes du système urbain. Ainsi, on peut distinguer les politiques de logement, les politiques d'emploi, les politiques d'investissement en infrastructures publiques, les politiques de zonage, de mode d'occupation des sols, les politiques de régulation de la demande de transport, les politiques de taxation, les politiques fiscales, etc.

223. Les bases théoriques

Webster *et alii* (1988) recensent plusieurs fondements théoriques sur lesquels s'appuient

les modèles intégrés existants. Ceux-ci renvoient à l'usage de toute une variété de théories et de techniques de modélisation. Les théories impliquées dans ces modèles renvoient à la micro-économie, l'entropie, la théorie de l'utilité aléatoire, la théorie de la base économique, la théorie économique du bien-être. En outre, Webster *et alii* soulignent que pour certains modèles l'identification à un fondement théorique donné n'est pas évident et qu'un modèle peut combiner différentes approches théoriques.

2231. La théorie micro-économique urbaine

Les travaux d'Alonso (1964), Mills (1972), *etc.* ont mis en évidence l'arbitrage entre accessibilité et consommation d'espace, et la nécessité de prendre en compte les revenus ou le budget des ménages afin d'établir les comportements de dépenses en matière de transport ou de logement (cf. chapitre 2). Les modèles intégrés qui se situent dans la lignée de la théorie micro-économique ne cherchent pas à simuler des évolutions plausibles mais à isoler celles qui semblent les plus souhaitables. Ce sont en général des modèles d'optimisation de la structure urbaine.

Le modèle SALOC (cf. plus loin) se présente comme un modèle d'optimisation de la localisation résidentielle. La dimension du transport demeure réduite, le modèle ne présente pas d'estimation de matrices de flux. Les transports n'apparaissent que par l'intermédiaire d'un indicateur du temps moyen de transport que l'on peut affecter à chaque zone *i* en fonction de son éloignement moyen aux lieux d'emplois, et aux lieux d'achats. Ce modèle n'est donc finalement qu'un modèle de localisation résidentielle faisant appel à des données de transport.

2232. La théorie de l'information

Les premières tentatives d'intégration dans une même structure des localisations et des transports ont été proposées par Wilson (1970). Ces travaux s'appuient sur ce concept de la maximisation de l'entropie (cf. Chapitre 2).

Le modèle LILT est un modèle interactif complet basé sur la maximisation de l'entropie. Il associe un modèle de localisation à la Wilson avec un modèle de transport à quatre étapes. Les prévisions des variations nettes totales de population sont exogènes, les nouveaux logements et les emplois dans l'aire étudiée sont distribués dans les zones selon les accessibilités interzonales, utilisant une fonction de maximisation d'entropie.

2233. La théorie de l'utilité aléatoire

La théorie des choix probabilistes ou théorie de l'utilité aléatoire a été introduite par McFadden (1973). Celle-ci a été présentée dans le chapitre 1, et une application aux choix de localisation a été exposée dans le chapitre 2. Elle fournit une approche plus flexible que celle de la micro-économie urbaine standard au problème de la représentation des choix. Wegener (1994) constate que la plupart des modèles interactifs les plus récents intègrent la théorie des choix discrets pour expliquer et prévoir les comportements des acteurs urbains tels que les investisseurs, les ménages, les firmes, les voyageurs. Certains modèles proposent une approche hybride entre la théorie de l'utilité aléatoire et les processus d'enchères à la Alonso (cf. les travaux de Martinez,

1995).

2234. La théorie de la base économique

La théorie de la base de la croissance régionale postule que le développement économique d'une région est fonction de son aptitude à exporter des biens de consommation à l'extérieur de la région. Les secteurs dits basiques génèrent la demande de biens et services pour les autres secteurs dits non basiques. Les secteurs basiques et non basiques génèrent des emplois et attirent de la population. Les ménages adressent aux secteurs non basiques une demande de biens et services (North, 1955). Dans le contexte de la modélisation urbaine, l'application de la théorie de la base implique que les emplois non basiques et la population soient déterminés de façon endogène. La théorie de la base économique urbaine fera l'objet d'une présentation plus détaillée dans le chapitre 5. Le modèle de Lowry (1964) reprend cette structure, ainsi que par la suite de nombreux modèles intégrés.

2235. La théorie de l'économie du bien-être

Il s'agit de l'ensemble des théories utilisées par les économistes pour mesurer les surplus associés à une action publique par les différents groupes d'individus ou par la société dans son ensemble. Certains modèles reposent sur le principe de maximisation du surplus du consommateur.

224. Les techniques de modélisation

Les différentes bases théoriques citées ci-dessus conduisent à l'utilisation de techniques de modélisation spécifiques. Ainsi, Webster *et alii* (1988) recensent différentes techniques de modélisation. Un recensement non exhaustif de ces techniques est présenté, ainsi qu'une brève description de chacune d'elles, certaines d'entre elles ayant déjà fait l'objet d'une présentation dans les chapitres précédents. Ces techniques de modélisation impliquent l'interaction spatiale, le principe de la maximisation de l'utilité, les modèles entrées/sorties, les mécanismes de survie de cohorte, etc.

2241. L'interaction spatiale

Les modèles d'interaction spatiale sont fréquemment utilisés afin d'estimer le niveau d'interaction entre deux zones géographiques. Ces modèles renvoient aux modèles gravitaires (cf. chapitre 2).

2242. La maximisation de l'utilité

Le principe de la maximisation de l'utilité est la pierre angulaire de la plupart des modèles représentant les choix des individus. Il est le principe de base de la micro-économie urbaine et celui de la théorie de l'utilité aléatoire. Dans le cadre de la théorie de l'utilité aléatoire, les mesures de l'utilité sont définies en fonction d'attributs relatifs aux caractéristiques socio-économiques de l'individu qui effectue le choix, et en fonction d'attributs du système de transport s'il s'agit d'un modèle de transport, ou en fonction des

attributs de la zone résidentielle et du logement (ainsi que celles de l'individu) s'il s'agit d'un modèle de localisation résidentielle.

2243. Les mécanismes de marché

Certains modèles proposent une représentation des mécanismes de marché de la ville, en particulier le marché foncier et immobilier. La confrontation de l'offre et de la demande est alors explicitement représentée. En ce qui concerne la représentation des marchés fonciers, les processus d'enchère peuvent être adaptés.

2244. Les mécanismes de survie de cohorte ou chaîne de Markov

Puisque les modèles visent à prévoir le développement urbain dans le futur, ils doivent également prévoir les changements dans la composition et la taille de la population, à moins que cela ne soit posé comme exogène. Pour ce faire, les modèles peuvent utiliser des modèles de cohorte ou des modèles de Markov (modèles de cycle de vie, ...). Le concept de cohorte, très employé en démographie, est voisin de celui de génération, et représente un « ensemble d'individus ayant vécu un événement semblable pendant la même période de temps » (Petit Robert). Qu'elle s'applique uniquement à la projection du nombre d'habitants dans une zone géographique donnée, pour mesurer les potentialités de croissance globale ou qu'elle s'intéresse plus finement à l'impact des changements structurels de la pyramide des âges, des modes de cohabitation ou des taux d'activité, l'étude des évolutions démographiques se trouve à la base de la plupart des analyses prospectives de la croissance urbaine et de la demande de transport.

2245. Les modèles entrées/sorties

L'analyse entrées-sorties, fondée sur le modèle des interdépendances sectorielles de Leontief est parfois utilisée pour décrire la structure de l'économie de la ville et effectuer des prévisions. Ce modèle permet d'introduire la dimension de la production et ses relations avec la structure urbaine et régionale. On peut considérer que le modèle de la base économique urbaine comme un modèle entrées-sorties (E-S) simplifié, avec seulement deux secteurs de production.

Le modèle E-S considère, dans une matrice carrée $n \times n$, les flux de vente (en ligne) et d'achat (en colonne) qui se manifestent annuellement parmi n secteurs de produits locaux (dits « flux intermédiaires »). La matrice est complétée par une série de colonnes présentant les ventes sectorielles à la demande « finale » (consommations privées et publiques, investissements, exportations), et par une série de lignes qui présentent les diverses composantes de la valeur ajoutée sectorielle (les achats de facteurs de produits originels, travail et capital en particulier, et donc les salaires et profits) et les importations. Les sommes des valeurs de chaque ligne, qui représentent les recettes totales par secteur, sont égales aux sommes des valeurs en colonne, représentant l'ensemble des coûts, comprenant les profits. Le tableau E-S permet d'établir les flux de vente du secteur i au secteur j , notés A_{ij} . A partir de ceci, on peut déterminer les « coefficients techniques » a_{ij} , correspondant au rapport entre les A_{ij} et la valeur de la production du secteur acquéreur j . Ces coefficients techniques indiquent combien il faut de francs de

produit i pour produire un franc de produit j . A partir de la matrice des coefficients techniques $[a_{ij}]$, on peut obtenir, grâce à l'algèbre linéaire, la matrice inverse de Léontief $[b_{ij}]$ qui permet de calculer la production de chaque secteur i , déterminée globalement par la demande finale adressée à chacun des secteurs j .

$$X_i = \sum_j b_{ij} D_j$$

La matrice $[b_{ij}]$ est dite « matrice des multiplicateurs ».

L'hypothèse de base typique des modèles E-S qui veut que les coefficients techniques demeurent constants malgré un accroissement de la production, suppose explicitement l'absence de rendements d'échelle ; en outre, si on veut utiliser les modèles pour réaliser des prévisions ou des simulations d'intervention publique, cela implique l'hypothèse de la constance temporelle de ces coefficients. Dans les modèles urbains, l'approche des matrices E-S est utilisée afin de représenter les liens entre les acteurs : les besoins des entreprises en employés, les besoins des employés en résidences, les besoins des résidents en nombre de commerce, etc. Ces matrices permettent de calculer les niveaux des besoins d'échange, que l'on peut nommer des « flux fonctionnels ».

2246. Les autres techniques employées

Certains modèles utilisent les techniques de microsimulation. Cette méthode consiste à générer des nombres aléatoires et à les utiliser afin de sélectionner une probabilité de distribution. La méthode la plus connue est la méthode de simulation Monte Carlo. Cette méthode a été introduite dans la modélisation des transports par Webster en 1958. D'autres modèles ont recours aux techniques de régressions linéaires. Ainsi, ils représentent les changements de l'urbanisation par des combinaisons linéaires de variables explicatives (principalement différentes mesures de l'attractivité des zones) et estiment la puissance des relations en utilisant des techniques de régression statistique. Enfin, les techniques de programmation mathématique sont parfois employées.

225. Les spécificités de représentation et de structure des modèles

Les modèles intégrés peuvent se distinguer selon certaines caractéristiques, et notamment selon la façon dont les variables, l'espace et le temps sont représentés dans le modèle, et d'autre part, selon certaines caractéristiques structurelles, notamment la prise en compte de la dynamique, le type de structure causale intégrée, le type de fonctions, etc.

représentation de :	relative position du modèle :	
I. Caractéristiques de représentation		
1) variables	aggrégée	désagrégée
2) aspects	peu de niveaux	nombreux découpages
	nombre de zones	nombre de petites tailles
	un seul niveau de découpage	plusieurs niveaux de découpage
	3) temps	longueurs
	statique	dynamique
II. Caractéristiques structurelles		
4) prise en compte de la dynamique	processus d'équilibre	pas de recherche d'équilibre
	pas de délai de retard	introduction de délais de retard
	unidirectionnelle	boucles de rétroaction
	5) type de fonctions	linéaires
	consécutives	concurrentes
6) prise en compte de l'écoulement	déterministique	probabilistique

Figure 3-4. Spécificité de représentation et de structure des modèles

2251. Les caractéristiques de représentation

Les caractéristiques de représentation renvoient au niveau de désagrégation des variables, à la façon dont est pris en considération l'espace et le temps. Ainsi, les individus statistiques considérés dans les modèles peuvent être représentés soit de façon très agrégée (on considère alors la valeur comportementale moyenne), soit très désagrégée (les individus sont classés en catégories selon des critères divers). En ce qui concerne la représentation de l'espace, étant donné la complexité des schémas d'occupation des sols et des déplacements, les fonctions spatiales continues ne peuvent être utilisées que pour représenter des villes très simplifiées. L'approche la plus adaptée pour représenter la structure spatiale d'une ville dans un objectif d'opérationnalité est de diviser l'aire urbaine en zones discrètes. Différents niveaux de découpage peuvent alors être adoptés allant d'un découpage très macroscopique à un découpage très fin. En outre, selon les étapes, les modèles peuvent avoir recours à des niveaux de découpage

différents (passage par technique d'agrégation). Enfin, la plupart des modèles représentent la dimension temporelle en subdivisant le temps en période discrète de temps (entre 1 et 5 ans).

2252. Les caractéristiques structurelles

La plupart des modèles interactifs visent à intégrer une dimension dynamique. Celle-ci est relative au type de représentation du temps prise en compte dans le modèle. Certains modèles recherchent une structure d'équilibre statique, d'autres sont dans un processus d'équilibre dynamique. Enfin, certains modèles représentent un processus évolutif non équilibré. Certains de ces modèles fonctionnent en pas à pas ce qui rend possible l'introduction de boucles rétroactives afin de rendre compte des comportements dynamiques à travers le temps.

De nombreux modèles emploient des fonctions linéaires, certains présentent néanmoins des fonctions non linéaires. En outre, les fonctions peuvent être organisées soit dans un schéma simultané, soit récursif. La majorité des modèles ont des structures probabilistiques.

Wegener (1994) souligne enfin une distinction importante entre les modèles intégrés qui se réfèrent à la structure globale du modèle. Deux groupes peuvent être distingués : le premier groupe est fondé sur le principe d'unification et lie tous les sous-modèles. Le deuxième groupe considère la ville comme un système hiérarchique d'interconnexion mais dont les sous-systèmes sont structurellement autonomes. Les premiers sont donc fortement intégrés, les seconds reposent sur le couplage de sous-modèles, où chaque sous-modèle a une structure indépendante. Le premier groupe est appelé unifié, le second composite. Cette distinction a des implications importantes sur les techniques de modélisation et sur le comportement dynamique du modèle.

Section 3. Les premiers enseignements et les limites des modèles intégrés

Un bilan critique doit être dressé à propos de ce type de modèles. Dans un premier temps, les résultats d'une procédure d'évaluation réalisée par plusieurs équipes scientifiques consistant à comparer les principaux modèles développés seront relatés. Cette étude tente d'apporter un éclairage quant aux performances de ces modèles en leur appliquant une série de tests. Dans un deuxième temps, un regard critique plus général sera porté sur ces modèles, reprenant la grille de lecture proposée par Bonnafous (1972) de jugement de l'opérationnalité des modèles.

31. Un essai d'évaluation : les travaux de l'ISGLUTI

Devant le nombre et la diversité des modèles intégrés développés, il convenait de faire le point de façon à porter un regard critique sur les performances de ces modèles. C'est sous l'impulsion du United Kingdom Transport and Road Research Laboratory qu'un programme de collaboration internationale, lancé dans les années 80 avec plusieurs

universités, s'est créé afin d'effectuer une étude comparative sur les principaux modèles disponibles. Les différentes équipes de recherche ont été regroupées au sein de l'International Study Group on Land Use / Transport Interaction (ISGLUTI). L'étude a débuté en 1981 et a réuni des chercheurs de huit pays et étudié neuf modèles opérationnels. Ces modèles sont les suivants :

- . des modèles japonais, avec CALUTAS conçu pour la ville de Tokyo et OSAKA pour la ville du même nom,
- . des modèles anglais, avec LILT construit pour la ville de Leeds et MEP développé par Echnique pour de nombreuses villes parmi lesquelles se trouve Bilbao,
- . un modèle suédois avec SALOC pour la ville d'Upsala,
- . un modèle allemand avec DORTMUND pour la ville du même nom,
- . un modèle australien avec TOPAZ pour la ville de Melbourne,
- . un modèle nord américain avec ITLUP développé notamment pour la baie de San Francisco,
- . un modèle néerlandais enfin avec AMERSFOORT conçu pour la ville du même nom.

311. Les modèles évalués par l'ISGLUTI

Sur les neuf modèles testés par l'ISGLUTI, sept sont des modèles de prévision, c'est-à-dire qu'ils estiment les résultats d'une politique particulière sur une période de temps donnée, et deux sont des modèles d'optimisation. Les derniers élaborent un ensemble de mesures qui sont destinées à conduire à un résultat particulier, par exemple la minimisation de la consommation d'énergie tout en permettant un niveau de mobilité acceptable. Les modèles d'optimisation ont des objectifs totalement différents des modèles de prévision puisqu'ils ne cherchent pas à simuler des évolutions plausibles mais à isoler celles qui semblent les plus souhaitables. Ils emploient des méthodes de modélisation différentes de celles des modèles de prévision, s'appuient sur les méthodes de maximisation de l'utilité globale ou de minimisation du coût global.

La théorie sous-jacente à la plupart des modèles est la maximisation de l'entropie mais certains modèles qui travaillent à un niveau plus désagréé s'appuient sur la théorie de l'utilité aléatoire et la théorie micro-économique. Les techniques d'interactions spatiales sont les techniques les plus employées bien que d'autres techniques impliquant la maximisation de l'utilité, les mécanismes de marché, la micro-simulation, la programmation linéaire et la programmation mathématique sont également utilisées.

Une brève description de chacun des modèles évalués est donnée ci-après.

3111. AMERFOORT (A)

Il s'agit d'un modèle relativement peu détaillé, qui se préoccupe principalement du problème de la localisation des logements. La place du transport dans ce modèle est relativement minime. Il utilise un mécanisme de type Lowry, reformulé selon le principe de maximisation de l'entropie à la Wilson, afin de déterminer les localisations résidentielles dans les différentes zones de l'aire d'étude en relation à leur accessibilité à l'emploi. Le modèle fournit comme résultat la détermination des localisations résidentielles en fonction des données exogènes que sont la localisation des activités et l'accessibilité entre différentes zones, et simultanément, calcule les flux de déplacements domicile-travail induits par ce schéma de localisation. L'accessibilité est mesurée d'une façon simpliste puisqu'il n'y a pas de représentation du réseau de transport et pas de représentation du partage modal. La population est désagrégée en trois groupes de revenus, chacun des groupes étant associé à un mécanisme différencié d'affectation des logements. Le modèle fait la distinction entre les logements et la population. Il a été appliqué dans les années 80 à Amersfoort (population : 150 000).

3112. OSAKA (O)

Il s'agit d'un modèle de localisation essentiellement empirique. Ce modèle se propose d'estimer la localisation résidentielle des individus et la localisation des activités non basiques entre différentes zones, à partir du calcul de régressions linéaires simples en partant de quelques données concernant la localisation des activités basiques et le niveau des rentes dans chaque zone. Pour ce faire, le modèle travaille à deux niveaux. En premier lieu sur un découpage en larges zones : c'est à ce niveau que, en fonction de la localisation des activités basiques qui est une donnée et donc dans la filiation du modèle de Lowry, les activités induites et les individus vont se localiser à l'intérieur de vastes zones, en fonction des accessibilités entre les différentes zones, estimées sous la forme d'un coût généralisé pour le transport en véhicule particulier et en train, le tout sous des contraintes de densité maximum. En deuxième lieu, le marché foncier est modélisé, à un niveau de découpage plus fin, avec des offres de loyers estimées à partir d'un processus stochastique délivrant une valeur autour des valeurs moyennes observées jusqu'alors. D'un point de vue mathématique, ce modèle se limite à un très faible nombre d'équations de base notamment à son niveau agrégé, avec des régressions linéaires qui permettent de déduire l'emploi et la population dans chaque zone en fonction de l'accessibilité, l'accessibilité en véhicule particulier étant retenue pour les déplacements liés à la localisation des activités et celle en train pour la localisation des individus, car au Japon, c'est le principal moyen de déplacement en raison de la très forte densité et des problèmes de circulation qui en résultent. Et au niveau désagrégé, ces quantités globales se disputent le sol à travers un mécanisme de marché. On a donc un processus complet de localisation qui est formalisé, mais totalement dans une logique de théorie de la base. La dimension transport est réduite dans ce modèle, elle n'apparaît ici qu'en tant qu'élément nécessaire au processus de détermination des localisations, sans qu'on en tire des enseignements en matière de transport : cela tient en partie à la méthode utilisée

qui ne conduit pas à estimer les matrices origine-destination comme c'était le cas avec la méthode de Wilson. On n'a donc aucune sortie dans le champ des transports qui n'apparaissent en tant qu'inputs. Et là aussi, il n'y a aucune rétroaction de l'évolution des localisations sur le système de transport, ce qui limite grandement l'apport de l'interaction entre transport et localisation. Ce modèle a été appliqué à l'agglomération d'OSAKA qui représentait 15 millions d'habitants.

3113. SALOC (S)

SALOC est un modèle d'optimisation de la structure urbaine qui ne donne pas une représentation explicite des déplacements bien que l'affectation des sols dépende de calculs d'accessibilité. SALOC est appliqué à Uppsala (Suède). Les transports ne sont introduits que par le biais d'un indice de temps moyen de transport que l'on peut affecter à chaque zone en fonction de son éloignement moyen aux lieux d'emploi, aux lieux d'achat et à Stockholm (Stockholm étant une des destinations privilégiées des migrations alternantes de Uppsala). Etant donné les schémas de localisation des emplois et les caractéristiques des déplacements, il affecte la population (non désagrégée) aux zones de l'aire d'étude de façon à satisfaire un ensemble d'objectifs de bien-être définis en fonction de l'accessibilité, la densité de la zone en logements, *etc.*

3114. TOPAZ (T)

TOPAZ est également un modèle d'optimisation de la structure urbaine. Dans son application pour l'ISGLUTI, le modèle détermine la distribution à la fois des emplois et des logements dans la région de Melbourne (population de 2,7 millions) de façon à minimiser la somme pondérée des coûts sur l'infrastructure urbaine et les coûts de transport subis. Contrairement au modèle SALOC, la représentation du système de transport est relativement plus sophistiquée. Les indicateurs de transport constituent en effet des éléments déterminants de la localisation (résidentielle et des activités). Le modèle présente une véritable phase de distribution des flux, fondée sur le principe de maximisation de l'entropie à double contrainte, ainsi qu'une phase de choix modal de type logit classique (entre le rail et la route). Ainsi, TOPAZ est à la fois un modèle d'optimisation des localisations et de prévisions des flux.

3115. CALUTAS (C) : un modèle de structuration spatiale pleinement intégré

Ce modèle a été conçu initialement avec pour objectif d'évaluer l'impact en matière de structuration urbaine de la construction d'un pont sur la baie de Tokyo. Il s'agit d'évaluer l'impact de la construction d'une infrastructure, et dès lors, les transports se doivent d'être saisis à un niveau relativement fin, d'où la présence d'un modèle de transport relativement conséquent et quasi exhaustif (seul le problème de la disposition ou non d'un véhicule particulier n'est pas abordé dans le modèle, ce qui a d'ailleurs peu d'importance dans l'application initiale qui se situe au Japon où, pour les individus, le train est le mode de transport dominant). Comme l'on se situe dans un espace vaste et dense, les auteurs ont opté pour une modélisation à deux niveaux : un niveau grossier avec de vastes zones à l'intérieur desquelles on réalise une première affectation, puis une localisation fine à

l'intérieur de chacune de ces zones. Au niveau agrégé, le modèle procède à une affectation des individus et des activités (dont les volumes sont des données) suivant les principes utilitaristes sous leur forme de théorie de l'utilité aléatoire, cette utilité étant évaluée à partir de déterminants renvoyant à un principe d'accessibilité : les activités de base ont une localisation donnée, et les individus, les industries et autres activités induites se localisent en fonction de ces premières localisations et d'autres caractéristiques appartenant à chacune des zones (qualité résidentielle d'une part et anticipations de profit de l'autre), sous des contraintes d'espace disponible (ce principe fait penser à la théorie de la base en ce sens que l'on distingue des activités de base prélocalisées, mais ce déterminisme n'est pas repris entièrement puisque le volume de ces activités de base ne conduit pas à la détermination des volumes de la population et des autres activités). Une fois cette première allocation réalisée, le sous-modèle d'allocation des localisations est lancé au niveau désagrégé, avec une concurrence entre les différentes catégories d'agents pour s'approprier les localisations, concurrence qui se traduit par la localisation de celui qui retire la meilleure utilité de cette localisation. Ensuite, on passe directement au lancement du sous-modèle de transport qui raisonne à un niveau agrégé et comporte l'ensemble des étapes habituellement contenues dans un modèle de transport, à savoir la génération et la distribution des trafics (découlant de la localisation suivant le principe de l'utilité aléatoire pour les déplacements domicile-travail, et grâce au recours à une formulation de type gravitaire pour l'ensemble des autres déplacements), ainsi que la phase de choix modal et d'affectation sur le réseau (envisagée de façon simplifiée) dans la logique séquentielle traditionnelle. Et les modifications qui vont apparaître dans le modèle de transport se traduiront par des changements dans la localisation des activités lors de l'étape de simulation suivante (chaque phase étant en principe d'une durée de 5 ans).

On a donc bien ici un modèle pleinement intégré dans la mesure où les effets d'une modification dans le système de transport trouvent leurs répercussions dans le processus de structuration spatiale, répercussions qui vont elles-mêmes conduire à des modifications dans le système de transport qui se traduiront par de nouvelles modifications lors de la période de simulation suivante. Toutefois, cette intégration prend plutôt la forme de l'établissement d'un chaînage entre un modèle de structuration spatiale et un modèle de transport classique, et non pas d'une imbrication des deux modèles pour n'en former qu'un seul (Duchier, 1991).

3116. ITLUP (I) : un modèle d'interaction spatiale généralisée

Ce modèle déjà ancien, puisque les bases en ont été jetées dès 1971 par Goldner, se propose de simuler la localisation résidentielle des ménages et la localisation des activités ainsi que les trafics qui en résultent à partir des données sur l'emploi par secteur (quatre secteurs sont distingués) et sur la population par catégorie (quatre catégories sont là aussi isolées), et du réseau de transport existant. Pour ce faire, le modèle a recours à une technique d'interaction spatiale généralisée de type maximisation de l'entropie, sans référence à la théorie de la base : les individus se localisent en fonction de l'accès aux emplois, du voisinage éventuel et de la quantité de terre disponible, tandis que la localisation des activités est déterminée en fonction de l'accès aux travailleurs tels qu'ils

étaient localisés lors de la période précédente et du niveau d'activité observé également lors de la période précédente. Il est à noter que ce processus de localisation ne se réalise sous l'effet d'aucune contrainte, et comme il n'y a pas de processus de marché, toute personne ou activité affectée l'est effectivement même si la zone considérée est déjà pleine : dès lors, la densité augmentera. Pour ce qui est de la partie transport du modèle, on a une structure séquentielle avec une phase de génération et de distribution des trafics simultanément à la phase de localisation consistant en l'application de matrices de probabilités de flux à partir des différentes localisations estimées. A la suite de quoi, on applique une phase de choix modal de type logit multinomial, et enfin une procédure d'affectation sur le réseau (à cette occasion, quatre types d'algorithmes sont utilisés au choix). ITLUP est peu exigeant en données, facilement transposable, et a fait l'objet de nombreuses applications à différentes villes, principalement aux Etats-Unis.

3117. LILT (L) : un modèle interactif complet fondé sur la maximisation de l'entropie

Ce modèle lie un modèle de localisation de type Lowry, reformulé selon les principes de Wilson, à un modèle de transport conventionnel. Cependant, ce modèle est relativement complet puisqu'il traite de la construction de l'habitat, de la localisation des emplois et de tout ce qui touche au système de transport, y compris les problèmes de motorisation. Pour ce qui est de la construction des habitations, le nombre de constructions est fixé de façon exogène et il est réparti entre les différentes zones suivant les variations relatives dans l'accessibilité des différentes zones, tandis que le coefficient de démolition des anciennes habitations est estimé à partir des évolutions passées. Ces habitations sont disponibles pour les trois différentes catégories d'individus (définies à partir du revenu) suivant un principe hiérarchique.

Le nombre des emplois disponibles par zone lui aussi est déterminé à partir de données exogènes sur l'emploi futur par secteur (douze secteurs différents étant représentés) : il s'agit bien d'emplois disponibles et non pas d'un volume global d'emplois, les emplois restant occupés d'une période à une autre n'étant pas disponibles. Pour ce qui est du niveau d'emploi global pour chaque secteur dans chaque zone, on a différents mécanismes à l'oeuvre suivant ces mêmes secteurs :

- Un mécanisme de trend (à la baisse) pour les activités déclinantes du secteur primaire (agriculture et mines). Cette caractéristique du modèle qui prend en compte les secteurs en déclin tient au cadre socio-économique dans lequel a été conçu ce modèle, la ville de Leeds, où les activités minières étaient en déclin ;

- Un mécanisme de répartition des activités secondaires en lien avec les modifications d'accessibilité depuis la dernière période ;

- Un mécanisme de répartition basé sur le coût généralisé de transport pour les activités tertiaires, en fonction des données de la période précédente.

La phase de détermination des localisations est précédée d'une étape d'estimation de la proportion de personnes possédant ou non un véhicule à partir de l'évolution passée du taux de motorisation et de celle des coûts généralisés des modes public et individuel. A la phase de détermination des localisations des individus est intégrée un processus de partage modal. Dès lors, on obtient simultanément les localisations des individus et les flux désagregés par mode. L'affectation de ces flux se réalisent selon des algorithmes traditionnels.

3118. MEP (M) / MEPLAN (M*) : un modèle de marché avec pour principe directeur la théorie de la base

A l'origine, ce modèle a été construit pour représenter Bilbao, une ville presque millionnaire. Il suit la tradition de Lowry : les emplois basiques, estimés de façon exogène, génère la population, qui à son tour induit des emplois, *etc.* Cependant, le principe de représentation des interactions spatiales et fonctionnelles est fondé sur des relations entrées-sorties qui permettent de déterminer la force des relations entre les différentes activités et la population. Ce modèle est relativement bien ancré dans la théorie économique, et a recours à trois principes théoriques :

- . la théorie de l'utilité aléatoire sur laquelle est assise la simulation du marché foncier,
- . la théorie de la base économique qui établit le principe structurant des échanges entre activités et individus,
- . les matrices entrées/sorties définies selon le principe de Léontief qui constituent un résumé des interrelations entre chacun des secteurs constituant l'économie nationale.

D'un point de vue pratique, le modèle se présente ainsi : le surcroît d'activités basiques est localisé en fonction de l'attractivité de chacune des zones, estimée à partir du plancher disponible et de l'existence ou non d'activités basiques lors de la période précédente notamment. De même, l'accroissement global des surfaces de plancher construites est réparti entre différentes zones en fonction des perspectives de profit liées au niveau des rentes observables lors de la période précédente et aux quantités de terrain disponible pour la construction. Par la suite, les localisations sont déterminées en fonction de ces éléments initiaux, ainsi que des coûts de transport et de la matrice input-output, par la mise en concurrence de tous les agents étant donné leur fonction d'utilité aléatoire. Cette situation de concurrence débouche sur un équilibre entre offre et demande, car les niveaux de rentes sont ajustés au fur et à mesure de l'itération du processus. Pour ce qui est des transports, les phases de génération et de distribution sont substituées par la matrice des coefficients entrées-sorties qui permet de connaître les flux de zone à zone. Le choix modal et l'affectation sont réalisés de façon séquentielle. La motorisation intervient dans le modèle de façon exogène. Enfin, une phase d'évaluation de l'ensemble des évolutions est menée, avec des calculs de surplus du consommateur (en termes d'espace et d'usage des transports). MEP a été remplacé par MEPLAN qui est

un modèle qui présente une structure très détaillée. Ce modèle a été utilisé pour tester l'effet du tunnel sous la Manche sur l'économie des régions européennes.

3119. DORTMUND (D) : un modèle de marché particulièrement désagré

Le modèle DORTMUND a été appliqué à la ville de Dortmund, ville millionnaire, et à ses communes environnantes. Il simule les décisions de localisation des industries, des résidents et des constructions immobilières ainsi que les décisions de déplacement selon une approche très désagrégée. Il a été développé par Wegener en 1983 (puis actualisé et redéveloppé en 1985 et 1996). La figure 3-5 présente une schématisation des principaux sous-systèmes considérés dans le modèle et les interactions entre chacun d'eux, ainsi que les instruments de politiques urbaines les plus importants. Le modèle présente quatre variables de stocks : la population, les emplois, les logements résidentiels, les constructions non résidentielles (locaux industriels, ou commerciaux, équipements publics). Les acteurs urbains associés à ces stocks sont des individus ou des ménages, des actifs, des promoteurs immobiliers et des firmes. Les agents interagissent sur cinq sous-marchés urbains : le marché du travail, le marché des locaux non résidentiels, le marché des logements, le marché des sols et des constructions, et le marché des transports. Les choix sur chaque sous-marché sont contraints par l'offre (le niveau d'emplois offerts, les stocks de locaux industriels et commerciaux disponibles, les logements inoccupés, les parcelles de sol vacantes, la capacité des réseaux de transport). Ces choix sont également guidés par des variables d'attractivité, qui sont des indicateurs de qualité et de prix. Les variables exogènes sont : les prévisions de l'emploi régional et de la population soumise à des tendances économiques et démographiques de long terme ou des politiques dans le domaine du développement du logement, des équipements publics et du transport.

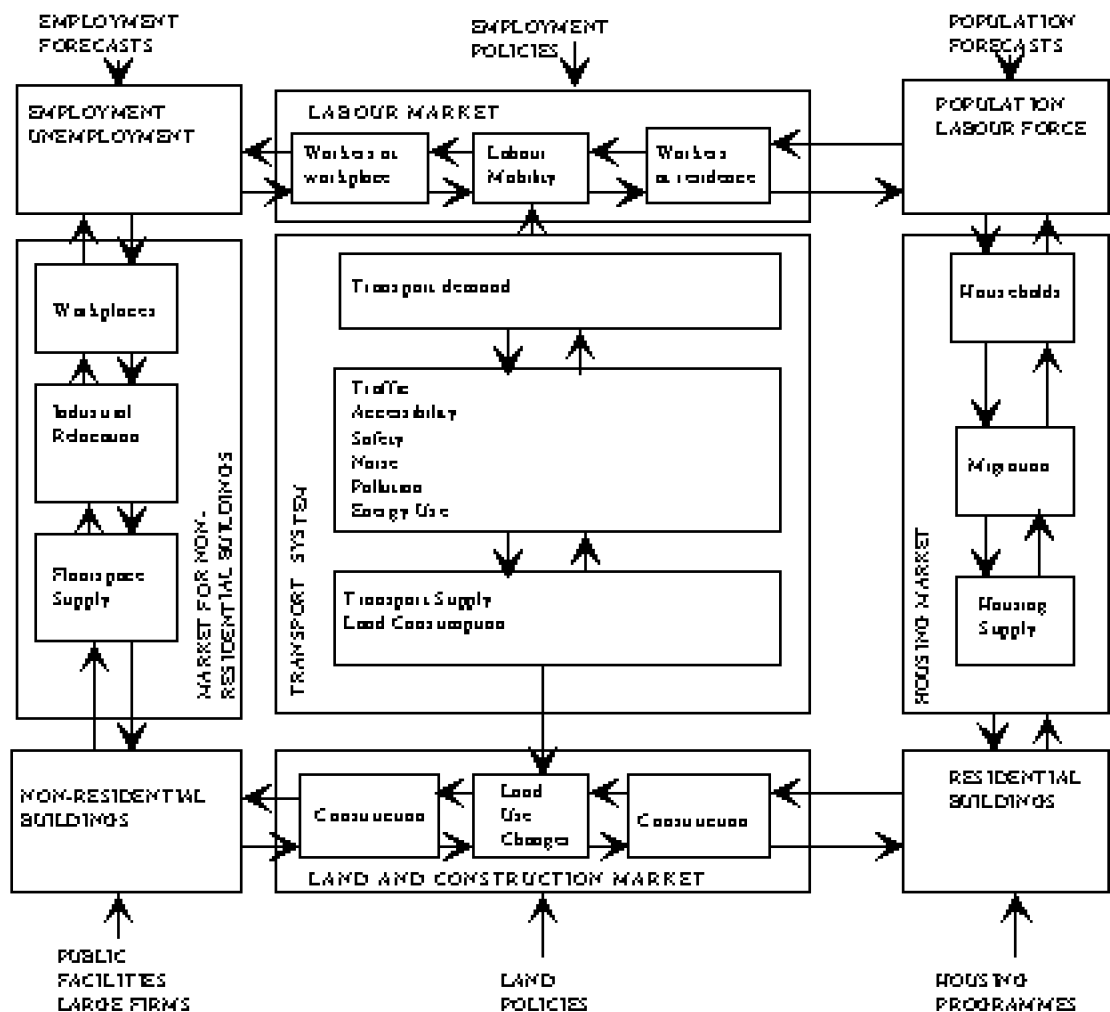


Figure 3-5. Architecture du modèle DORTMUND

Le modèle DOTRMUND est très détaillé et a été conçu dans une toute autre optique que les modèles vus jusqu'alors : en effet, son objectif principal est beaucoup plus ciblé et beaucoup plus ambitieux, puisqu'il propose d'évaluer les conséquences en termes de structuration spatiale et de transport de l'évolution économique appréhendée par l'évolution de l'emploi dans chaque secteur (quarante secteurs sont représentés dans ce modèle, alors que dans les autres, ils n'étaient que quelques-uns, au maximum une quinzaine) et de la population elle-même désagrégée très fortement suivant des critères socio-économiques en trente catégories de ménages, et quatre-vingts catégories d'individus (les autres modèles ne dépassant pas quatre catégories en l'occurrence). Dès lors, l'analyse de l'espace urbain va se voir fixer d'autres objectifs comme celui d'analyser le vieillissement de la population et des infrastructures, tandis qu'une variable comme le taux de motorisation est aussi envisagée dans ses liens avec l'activité économique.

L'ensemble de ce processus est modélisé par le recours à la théorie de l'utilité aléatoire, enrichie de petits modèles d'évolution des individus et des infrastructures et de détermination du taux de motorisation. Pour ce qui est de la localisation des individus, le modèle considère à la fois la modélisation de la demande suivant la théorie de l'utilité aléatoire, et la modélisation de l'offre de logements sous une forme logit prenant en

compte l'espace disponible dans la zone et l'utilité retirée par le promoteur de la construction d'un même type de logement dans cette même zone lors de la période précédente.

Le modèle de transport est également très complet, intègre de nombreux motifs et modes de transport. Il présente une détermination interne de la motorisation en fonction du budget transport des familles et du coût d'entretien d'un véhicule, une phase de distribution des flux sur le principe de maximisation de l'entropie contrainte à l'origine et à destination pour le travail et pour l'école et seulement à l'origine pour les achats de biens et services, intègre une phase de choix du mode, et enfin présente une phase d'affectation sur le réseau avec capacité contrainte. Ce modèle de transport est itéré plusieurs fois jusqu'à ce que l'équilibre soit atteint.

312. Les principes de la méthode d'évaluation

Malgré les différences des modèles tant dans leurs objectifs, leur forme et aux méthodes auxquelles ils recourent, les auteurs de cette étude ont estimé que ces modèles produisaient des résultats qui sont partiellement comparables et à partir desquels un jugement de leurs performances peut être porté. L'objectif de cette étude comparative a visé d'une part à réaliser une appréciation critique des modèles, et d'autre part, à comparer l'efficacité de tout un éventail de politiques couramment appliquées tant sur l'urbanisation que sur les transports.

L'étude a procédé en deux phases. Dans la première phase, les neuf modèles ont été soumis à une batterie de tests rigoureux. Pour des raisons pratiques, chaque modèle a été appliqué à la ville sur laquelle il avait été calibré au départ. Les résultats de ces différents tests ont pu mettre en exergue les potentialités des modèles, leurs faiblesses et leur cohérence, et donner quelques éclairages sur les impacts des politiques testées. Cependant, la méthodologie choisie a posé des difficultés de comparaison des résultats entre les différents modèles, les aires d'application n'étant pas les mêmes. Rien ne pouvait assurer de savoir si les différences de résultats observées entre les modèles étaient dues à des caractéristiques particulières des modèles ou à des différences résultant de l'application de politiques à des villes très différentes de par leur taille, les caractéristiques du réseau de transport, etc.

Une deuxième phase a été élaborée afin de dépasser ces difficultés. Elle a consisté en deux types d'analyse. D'une part, l'application de modèles distincts à une et seule ville, d'autre part, l'application d'un même modèle à plusieurs villes. L'objectif de cette deuxième phase était de produire une évaluation comparative plus rigoureuse de ces différents modèles. Dans la pratique, cette opération s'est révélée extrêmement délicate nécessitant le transfert des modèles et des données socio-économiques, d'urbanisation et de transport entre les différentes équipes. Plusieurs raisons expliquent que cette tâche se soit révélée difficile. La première est liée au fait qu'il n'existe pas de théorie communément acceptée qui sous-tend l'ensemble des modèles. La deuxième raison, est que chacun de ces modèles a été développé pour être appliqué à des échelles spatiales différentes, pour un objectif bien défini, de telle sorte que certaines adaptations sont apparues inévitables afin que ces modèles puissent être appliqués à d'autres villes dans

la phase 2. Cependant, ces transformations devaient rester marginales, ne remettant pas en cause la philosophie du modèle. La troisième est qu'il s'agit de modèles complexes, parfois encore en développement, ainsi l'appropriation de ces outils par les autres équipes était laborieuse. Enfin, la connaissance des réactions de long terme sur l'urbanisation et les transports étant minime, il en résulte un manque de références solides pour pouvoir juger de façon totalement objective de la pertinence des projections des modèles.

Les différents tests appliqués portaient sur l'évolution de la structuration urbaine et du système de transport en cas d'évolutions contrastées de la population, de changement de localisation des activités industrielles, sous contrainte d'usage des sols. Des variations dans les coûts et les temps de transport ont également été testés.

313. Les résultats de l'étude d'évaluation

3131. Les résultats de la première phase

Dans cette première phase, 39 tests ont été conçus. Dans la pratique, ces tests n'ont pas pu être appliqués à l'ensemble des modèles. Par exemple, du fait que SALOC soit un modèle d'optimisation, il était peu adapté aux tests. D'autre part, le manque de ressources a conduit à limiter le nombre de tests sur certains modèles. AMERFOORT et OSAKA étant essentiellement des modèles d'urbanisation, présentant seulement quelques rudiments de mécanismes de transport, et dans une moindre mesure CALUTAS et TOPAZ, ils ne pouvaient pas expérimenter des tests de politiques de transport. Les seuls modèles capables d'expérimenter tous les types de tests proposés étaient DORTMUND, LILT et MEP (remplacé par MEPLAN dans la seconde phase).

Les impacts des politiques ont été jugés par rapport à une projection de référence sur 20 ans (situation « fil de l'eau »), qui représente un prolongement des tendances passées et introduit les modifications en urbanisation et en transport programmées.

Les résultats de la première phase ont permis d'éclairer les performances de chacun des modèles et les améliorations qu'ils devaient recevoir. D'une façon générale, les modules d'urbanisation ont été jugés satisfaisants au regard de leurs projections. En termes de résultats, les tests montrent que la localisation des emplois, et en particulier celles des emplois de détail, est plus sensible aux variations des coûts de transport que celle de la population. Les modèles présentent dans l'ensemble une convergence quant au sens des réactions. En revanche, les résultats en termes d'intensité des réactions sont peu semblables. D'un autre côté, et d'une façon un peu plus surprenante, les modules de transport semblent être moins satisfaisants. Les auteurs de l'étude apportent plusieurs explications à ce fait. La première est que l'attention a été davantage portée sur les aspects de la modélisation de l'urbanisation, la deuxième est liée au fait que les comportements réels de déplacement sont mieux connus que les comportements de localisation et qu'ainsi les divergences entre les projections et les comportements attendus sont plus facilement repérables.

Les principales conclusions des tests sont les suivantes (Duchier, 1991) :

la localisation endogène des activités semble être une nécessité difficilement contournable, les modèles introduisant la localisation de façon exogène produisent en effet des variations d'amplitude plus importante que ceux qui les endogénéisent. Car si un modèle comme AMERSFOORT donne des résultats allant dans le sens que ceux des autres modèles, l'amplitude des évolutions prévues est d'une tout autre taille.

La représentation explicite des systèmes de transport, ainsi que celles des activités et enfin des marchés des sols semblent être une nécessité.

Le recours à des méthodes de modélisation trop rudimentaires, comme dans le cas d'OSAKA, conduit à des résultats dont la pertinence semble inférieure à celle des autres : en effet, dans l'exemple donné, le recours à une linéarité des fonctions concourant à la localisation des différents agents fait que les comportements des différentes catégories d'activités et de population sont du même type, car on ne peut qu'imparfaitement rendre compte des phénomènes de compétition entre différentes catégories au moyen d'équations linéaires.

La désagrégation de la population en différentes catégories ainsi que celle des activités paraît relativement importante dans la qualité des résultats, au moins à un niveau grossier : à l'occasion des différents tests qui ont été menés, il apparaît que ces différentes catégories adoptent parfois (souvent même) des comportements différents, notamment en raison de leurs capacités financières différentes pour les individus et du type de relation qu'ils entretiennent avec l'extérieur pour les entreprises (clientèle, accès aux emplois,...). En isolant ainsi des comportements différents à partir d'une désagrégation des différentes catégories d'agents, on limite l'ampleur de l'aléa et on aboutit donc à une meilleure compréhension des phénomènes.

Enfin, il est certain que la prise en compte de la motorisation est importante pour que les modèles qui se donnent pour objectif une approche approfondie du domaine des transports, mais il semble bien que la détermination endogène de cette motorisation est à l'heure actuelle encore une gageure : seuls DORTMUND et LILT l'ont tentée, mais DORTMUND semble entaché de graves dysfonctionnements à ce niveau, tandis que les résultats de LILT semblent à peine plus dignes de confiance. Le recours à des évaluations externes est sans doute préférable, tant la complexité du processus qui concourt à ce phénomène semble difficile à saisir en quelques équations.

Ces quelques conclusions issues de l'analyse des résultats des tests tendent à réduire grandement le nombre de modèles qui réellement semblent pouvoir prétendre à une opérationnalité importante : de fait, il apparaît bien que seuls CALUTAS, DORTMUND, LILT et MEP demeurent dans cet ensemble (ITLUP n'ayant pu être testé tandis que la structure optimisatrice de TOPAZ rend difficile sa comparaison détaillée avec les autres modèles, les contraintes n'étant pas les mêmes).

Cependant, cette première phase s'est heurtée au problème de la forte influence des données implémentant chaque modèle, et de façon plus fondamentale, de l'influence du type d'agglomération, sa structure, la configuration de son réseau de transport, sur les résultats. La deuxième phase de l'étude essaye de dépasser ce problème.

3132. Les résultats de la deuxième phase

A l'issue de la phase 1, les auteurs ont mis en évidence les forces et les faiblesses des modèles, et les améliorations qui devaient être apportées pour palier les imperfections soulevées par ces premiers tests. Cette première phase a également conduit à donner un éclairage sur les impacts que pouvaient avoir les politiques de transport et d'urbanisation, mais du fait de la méthodologie adoptée, rien ne pouvait assurer de savoir si les différences de résultats étaient dues à des caractéristiques particulières des modèles ou à des différences des formes urbaines.

Un des premiers enseignements de la deuxième phase est, qu'en effet, un même modèle appliqué à des villes différentes ne donne pas les mêmes résultats, ce qui confirme l'existence de différences entre les villes, résultant d'une structuration spatiale différente, d'habitudes de comportements différentes.

La pratique du test consistant à appliquer plusieurs modèles à une même ville s'est révélée délicate, cela en particulier à cause de la difficulté de transférer les modèles et de disposer de données adéquates. Les chercheurs se sont ainsi confrontés au problème de la non transposabilité parfaite de certains modèles à d'autres villes sur lesquelles ils n'avaient pas fait l'objet d'un premier calage. Les données nécessaires pour le calage du modèle ou les données nécessaires pour les tests des mesures politiques n'étaient pas toujours disponibles à un niveau de détail approprié pour satisfaire les performances du modèle. L'application de plusieurs modèles sur une même ville, c'est-à-dire sur la base d'un même ensemble de données, représente un test relativement rigoureux.

Deux modèles (LILT et MEPLAN) ont été testés sur trois villes chacun. La ville de Dortmund a été le terrain d'application de quatre modèles, celle de Leeds de trois modèles et enfin la ville de Tokyo de deux modèles. Dans la phase 2, 19 tests seulement ont été appliqués.

Test 121	Augmentation de la population et des emplois de 2% par an ; capacités routières inchangées.
Test 122	Même hypothèse que dans 121 avec des restrictions sur le développement périphérique.
Test 131	La moitié des emplois industriels se délocalisent de l'aire centrale vers les aires externes.
Test 132	La moitié des emplois industriels partent de l'aire centrale vers un pôle périphérique industriel.
Test 133	Tous les emplois industriels sont redistribués vers les aires résidentielles.
Test 141	La moitié des emplois de détail du centre-ville est redistribuée vers les aires périphériques.
Test 142	Un nouveau centre commercial équivalent en taille à celui d'un quartier du centre-ville est implanté en périphérie.
Test 143	Le stationnement est rendu gratuit en période creuse.
Test 144	Le transport public est gratuit en période creuse.
Test 152	Tous les coûts monétaires de déplacements sont doublés.
Test 153	Les coûts d'usage de la voiture particulière sont multipliés par 4
Test 155	Les charges de stationnement dans l'aire centrale augmentent d'un facteur 3 le coût moyen d'un déplacement.
Test 156	Le transport public est gratuit
Test 158	Les tarifs des transports collectifs sont doublés.
Test 161	La vitesse de tous les modes mécanisés augmente de 20%.
Test 163	La vitesse des transports collectifs augmente de 20% celle de la voiture particulière diminue de 20%
Test 165	Une nouvelle route périphérique encerclant la banlieue est construite permettant une vitesse autorisée de 80km/h.
Test 166	Une nouvelle rocade interne est construite, permettant une vitesse de 60 km/h.
Test 168	Une nouvelle ligne de métro traversant la ville est construite permettant une vitesse de 60 km/h.

Tableau 3-2. Liste des tests appliqués

Pour les responsables de l'étude ISGLUTI, la deuxième phase de l'étude constitue un protocole d'évaluation solide. Il est en effet relativement aisé, lorsqu'un seul modèle est appliqué à une seule ville de trouver des explications satisfaisantes concernant l'ampleur et le sens des différents impacts. De même, lorsqu'un même modèle est appliqué à plusieurs villes, il n'est pas trop difficile de trouver des explications plausibles sur la différence des impacts selon la ville. Lorsque plusieurs modèles sont appliqués à une même ville, si l'on observe des divergences de résultats, cela tend à montrer que les hypothèses représentées par certains modèles sont déficientes, mal adaptées. Les investigations sur les impacts des différentes politiques de la phase 2 ont montré la présence d'une forte variabilité dans les réponses des différents modèles

De façon générale, les auteurs de l'étude aboutissent à la conclusion que les tests de la deuxième phase confirment combien ces modèles sont utiles pour un certain nombre de tâches clairement définies et apportent des lumières nouvelles sur les impacts d'un certain nombre de politiques urbaines. Les auteurs ont constaté une convergence raisonnable dans les résultats, non seulement sur les signes des réactions, mais également quant à leur intensité. Un examen des résultats de l'application de trois modèles à la ville de Dortmund (Wegener, *et al.* 1991) a montré une bonne convergence

des indicateurs de résultats. Toutefois, sur certains résultats, une certaine divergence dans les réponses des modèles a pu être observée, à la fois dans l'intensité de la réponse, mais aussi parfois sur le sens de la réponse. Cela montre combien les modèles sont différents dans leurs causalités, mais pose la difficulté de savoir quel est le modèle le plus pertinent. Cependant, cette divergence n'a pas été observée très souvent. En outre, les auteurs ont estimé que les différences de résultats issus des modèles étaient davantage dues à des problèmes d'application des modèles à des villes particulières plutôt qu'à des problèmes de conception de base de la structure des modèles. Ces problèmes d'application peuvent être expliqués par la pauvreté des données, le manque de données particulières pour calibrer correctement une relation, ou d'une attention insuffisante consacrée au processus de calibration / validation.

Du côté des impacts des mesures des politiques, l'ISGLUTI a été capable de confirmer un certain nombre d'effets bien connus, et d'éclairer les chercheurs sur des effets moins connus à long terme. En particulier, des tests sur l'impact des changements dans les coûts de transports ont été menés (Webster, Paulley, 1993). Il est apparu que les utilisateurs de l'automobile ne sont pas beaucoup affectés par les changements dans les coûts d'utilisation de la voiture particulière. Par contre, les modèles ne parviennent pas à une conclusion convergente sur les impacts des modifications des coûts de transport sur l'occupation des sols. Cependant, la plupart montrent un effet minime des politiques de transport sur les mouvements globaux de population, malgré le rôle historique qu'on leur reconnaît. Cela est probablement lié au fait que les villes modernes ont déjà un système de transport bien développé, ainsi la portée des améliorations générales dans l'accessibilité est limitée.

Il semble, eu égard les résultats de l'étude ISGLUTI, que les modèles interactifs de transport et de localisation soient plus largement acceptés qu'auparavant¹⁴. Cependant, cette série de tests ne constitue pas vraiment une procédure de recherche de validité de ces modèles. La difficulté d'évaluer ces modèles est liée à leur horizon temporel de long terme. L'ultime test pour valider ces modèles serait de les appliquer de manière rétrospective afin de tenter de reproduire l'évolution du système urbain sur une longue période. Cette solution se heurte à la disponibilité des données nécessaires à ce travail (manque de données historiques dans de nombreux domaines). Une autre solution serait de tester un programme d'investissement majeur en transport ou dans le domaine des politiques d'usage des sols, et d'effectuer une confrontation entre les résultats simulés et les effets effectivement observés. Mais cela nécessite une procédure lourde et coûteuse (par exemple, la mise en place d'un observatoire de ces effets).

Malgré les conclusions relativement optimistes des auteurs de l'ISGLUTI, il reste un certain scepticisme (Duchier, 1991) du fait de certaines divergences dans les résultats produits par les modèles. Cependant, les auteurs de l'étude insistent sur le potentiel de perfectionnement de ces modèles et sur les perspectives qu'ils apportent au domaine de la prévision de la demande de transport. Ainsi, la critique adressée aux modèles interactifs de transport et de localisation est moins sévère que celle formulée par Lee

¹⁴ On peut souligner à ce titre qu'une tentative d'application d'un modèle interactif sur une agglomération française (Lyon) a été menée. Ce projet, initié par le CERTU, vise à appliquer le modèle TRANUS, développé par De la Barra.

(1973) dans les années 70. Des progrès remarquables ont été produits, tant dans la méthodologie que dans les fondements théoriques de ces modèles. Il n'en demeure pas moins que des améliorations doivent être encore réalisées avant que ceux-ci ne fassent véritablement l'unanimité et puissent être utilisés en toute confiance.

314. L'évolution des modèles intégrés

L'évolution qualitative des modèles interactifs depuis leur début jusqu'à aujourd'hui doit être soulignée. Des efforts sensibles ont été portés sur les fondements théoriques économiques de ces modèles. La représentation des comportements a été davantage intégrée. La plupart des modèles les plus récents se fondent sur la théorie de l'utilité aléatoire qui contribue à apporter une plus grande cohérence et pertinence théorique à ces modèles. Par ailleurs, la recherche dans ce domaine, qui se présente comme un véritable défi, a été le terreau de certaines innovations méthodologiques et théoriques, capables de combiner les exigences de pertinence théorique et d'adaptabilité empirique. Les travaux de Martinez sur la théorie du « Bid choice » en sont une illustration (cf. plus loin).

Enfin, à cette problématique de l'interaction transport-urbanisation de long terme, s'est très vite venue se greffer celle de l'interaction avec l'environnement. Cette démarche s'inscrit dans la problématique du développement durable. L'idée du développement durable, c'est-à-dire l'idée « d'un développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures de répondre au leur correspond à la volonté de ne plus produire des prévisions mais se doter d'une certaine compréhension des conséquences à venir de la confrontation des processus naturels et de la logique de développement qualitatif et/ou quantitatif de certains phénomènes socio-économiques » (Nicolas, 1996). La problématique environnementale est en effet à placer dans une perspective de long terme vis-à-vis du système de transport mais également vis-à-vis des formes urbaines. En effet, les formes urbaines ont des incidences sur les émissions polluantes. Il est admis que les villes denses engendrent moins de consommation d'énergie dans les transports que les distances à parcourir sont moins longues. Aussi, les modèles interactifs de transport-urbanisation constituent des instruments pertinents pour la problématique du développement durable. De nombreux modèles d'interaction transport-urbanisation ont greffé un modèle « émissions polluantes » à leur structure. A ce titre, les modèles modélisant explicitement les comportements de motorisation présentent un net avantage.

32. De l'opérationnalité des modèles interactifs

Nous allons tenté d'évaluer les performances des modèles interactifs à la lumière des exigences de l'opérationnalité d'un modèle quantitatif énoncées par Bonnafous (1972). Bonnafous souligne que quelque soit la discipline à laquelle il se rapporte, un modèle quantitatif pose certains problèmes fondamentaux. Un modèle est une représentation simplifiée de la réalité, mais le processus de simplification doit respecter un mode d'opérer qui demeure en contact avec la réalité. La réalité, telle qu'elle est délimitée en première analyse constitue l'objet du modèle. La formulation ou la définition d'une action

constitue son objectif. Définir l'objet et l'objectif du modèle revient à préciser les performances que l'on attend de lui. Bonnafous appelle l'opérationnalité d'un modèle, l'aptitude du modèle à réaliser ces performances. Un modèle devient un instrument lorsqu'il est opérationnel. Parce que cet instrument est qualifié de scientifique, l'opérationnalité requiert une discipline, doit satisfaire à des impératifs.

321. Les conditions de l'opérationnalité d'un modèle quantitatif

Bonnafous (1972) distingue trois propriétés fondamentales du modèle : la cohérence, la pertinence et la mesurabilité. Ces trois propriétés sont : des conditions nécessaires de l'opérationnalité, leur conjonction en est une condition suffisante, elles sont par nature contradictoires et forment ce que Bonnafous appelle la problématique du modèle.

3211. L'exigence de cohérence

La cohérence du modèle, c'est tout à la fois une propriété de cohérence interne, au sens de non contradiction, et une exigence de cohérence impliquée par l'objectif du modèle. Le premier terme correspond à une condition triviale de non contradiction, hors de laquelle l'usage du formalisme mathématique, et par conséquent la « construction simplifiée » que constitue le modèle, n'ont pas de signification. Dans le deuxième terme la cohérence d'objectif est aussi une condition nécessaire évidente de l'opérationnalité. Le modèle ne peut pas en effet être opérationnel si son formalisme ne s'y prête pas. Le deuxième terme, la cohérence d'objectif a un rôle prépondérant. Ce dernier point signifie une parfaite compatibilité entre la structure logico-mathématique du modèle et ses ambitions théoriques. En outre, la condition de cohérence dépend de contraintes extérieures au modèle, car si elle concerne la compatibilité nécessaire entre l'objectif du modèle et son formalisme mathématique, ce dernier est limité au champ de la connaissance mathématique.

3212. L'exigence de pertinence du modèle

La pertinence du modèle, c'est la conformité de structure logico-mathématique, en particulier sous sa forme numérique, avec les réalités de l'objet, telles qu'on peut les appréhender. Par structure mathématique du modèle, nous entendons l'ensemble des équations et le cas échéant, des distributions probabilistes qu'il comporte. Par structure logique du modèle, nous entendons la distribution des rôles respectifs (d'effets ou de causes) des variables, ainsi que l'ensemble des relations de causalité. En effet, dans la mesure où le modèle est destiné « à expliquer la réalité ou à agir sur elle », il est nécessaire qu'il soit une approximation de cette réalité, qu'il soit pertinent. Bonnafous souligne que « c'est à l'évidence une condition qui ne peut être considérée et vérifiée que d'une manière relative ». Elle concerne la compatibilité entre le formalisme déterminé par la cohérence du modèle et l'objet de ce modèle.

3213. L'exigence de mesurabilité

La mesurabilité correspond à la possibilité de proposer une estimation pour toutes les grandeurs intervenant dans le modèle. Cela concerne aussi bien les variables pour

lesquelles un échantillon doit être disponible ou accessible, que les paramètres qu'il doit être possible d'estimer sur la base de l'échantillon des variables. Cette exigence rejoint celle de vérification, unanimement admise comme critère fondamental de scientificité, sans laquelle le modèle ne saurait être considéré comme un instrument scientifique dans la mesure où l'on ne pourrait pas prendre la mesure de ses possibilités opérationnelles.

Au total, l'aptitude du modèle à réaliser son objectif dépend de chacune des conditions que nous avons distinguées. Ces trois conditions entretiennent à la fois des relations de complémentarité et des relations de contradiction ce qui forme la problématique du modèle.

322. La confrontation des modèles intégrés aux exigences de cohérence, pertinence et mesurabilité

Les modèles interactifs de transport et de localisation visent clairement l'opérationnalité. Ainsi, ils se heurtent nécessairement au triptyque des trois conditions de cohérence, pertinence et mesurabilité (Bonnaïous, 1972). Néanmoins, au regard de la diversité des modèles que nous avons précédemment souligné, nous ne pouvons tirer de conclusions générales sur ces modèles. La confrontation des exigences de cohérence, pertinence, mesurabilité avec ces types de modèles ne peut être menée qu'au cas par cas.

3221. La condition de cohérence

Quant au problème de la cohérence, l'insuffisance de bases théoriques solides subsiste encore, en particulier dans les modèles les plus rudimentaires fortement agrégés et mettant en oeuvre une simplification abusive des mécanismes. Cependant, l'intégration de la théorie des choix discrets dans la plupart des modèles les plus récents permet d'une certaine façon de palier à cette difficulté, en apportant des bases théoriques assez bien établies et une meilleure prise en compte des comportements réels des agents.

3222. La condition de pertinence

Les modèles interactifs visent en particulier une plus grande pertinence eu regard leur objectif, celui de rendre compte des évolutions du système urbain face à des stimuli de plusieurs types. Cela les conduit à introduire des variables ou des mécanismes supplémentaires qui posent souvent des difficultés de mesures et de problème de cohérence.

3223. La condition de mesurabilité

Ces modèles sont souvent confrontés au manque de données disponibles, ce qui les contraint parfois à réduire le nombre de leurs variables et donc à perdre en pertinence. Malgré une amélioration des bases de données disponibles notamment dans le domaine des déplacements (avec les enquêtes ménage de déplacements par exemple), il n'en demeure pas moins que ces bases restent insuffisantes tant dans leur qualité que dans le recul temporel qu'elles permettent. En effet, on ne peut que déplorer l'absence de séries temporelles dans ce domaine. En ce qui concerne le champ de l'occupation des sols, les

mêmes problèmes se rencontrent, en particulier quant à la connaissance des marchés fonciers et immobiliers.

Section 4. Quelques exemples de modèles intégrés

Les deux modèles décrits ci-après (le modèle TRANUS et le modèle 5-LUT) n'ont pas été évalués par l'ISGLUTI car il s'agit de travaux plus récents. Nous avons choisi de les présenter plus en détail dans la mesure où ils nous semblaient être relativement aboutis quant à leur objectif et théoriquement intéressante.

41. Le modèle TRANUS

Le modèle TRANUS a été développé par De la Barra et Perez depuis 1982.

411. Description du modèle TRANUS

TRANUS est un modèle intégré qui peut être appliqué à l'échelle urbaine ou régionale. Il a deux objectifs : premièrement, la simulation des effets probables des politiques d'urbanisation et des projets de transport ; deuxièmement, l'évaluation de ces effets à un niveau social, économique et financier. Ce modèle, dans sa conception, est proche du modèle MEPLAN développé par l'équipe de Marcial Echnique depuis 1978.

Le système TRANUS obéit à certaines lignes directrices :

- le système doit être simple et efficient, permettant une implémentation sur des micro-ordinateurs, mais sans sacrifice de détail en particulier en ce qui concerne le système de transport ;

- dans l'objectif d'atteindre une certaine cohérence théorique, le système doit adopter une structure théorique unique pour la représentation du phénomène d'urbanisation et celui des transports, fondée sur des modèles logit multinomiaux emboîtés ;

- le modèle d'urbanisation doit être capable de représenter les variables d'emplois, de la population et des types d'usages des sols, et doit permettre la génération des flux entre toutes les activités et proposer une représentation explicite du marché foncier ;

- le modèle de transport doit présenter un certain nombre de caractéristiques, telles que l'introduction d'une élasticité dans le module de génération, une recherche d'itinéraire multi-chemins dans le module d'affectation, la possibilité de combiner des marchandises et des voyageurs, d'intégrer la tarification, les calculs de temps d'attente et en aval des indicateurs d'évaluation ;

- la structure du programme doit être suffisamment flexible afin de faciliter l'application à différents contextes, tels que des pays en voie de développement ;

le système doit être conçu avec un certain nombre d'équipements complémentaires, tels que des systèmes de bases de données interactives, des systèmes d'aide à la calibration, des programmes d'évaluation, etc.

4111. La structure générale du modèle

De façon classique, le modèle comporte deux sous-modèles : un modèle d'urbanisation et un modèle de transport. Le modèle d'urbanisation estime la localisation des activités dans différentes zones, et s'équilibre selon les propriétés du marché. Le processus de localisation des activités fournit un ensemble de matrices, représentant les flux fonctionnels de i à j des secteurs socio-économiques n . Dans le modèle de transport, les matrices des flux fonctionnels sont transformés en matrices de déplacements grâce au modèle de génération de déplacements. En d'autres termes, les flux fonctionnels déterminent la demande de déplacement pour chaque paire O-D, et suppose que cette transformation soit immédiate. Ainsi, les schémas d'activités de la période t déterminent la demande de transport de la période t . Le modèle de transport, en retour, calcule les coûts généralisés de transport, qui sont des composantes de la fonction d'utilité du modèle de localisation des activités. Les coûts de transport sont donc réintroduits dans le modèle de localisation, mais il est supposé que cette rétroaction ne se fasse pas immédiatement. Elle se réalise à la période suivante. Cela représente l'inertie du système de localisation à s'adapter au changement du système de transport.

Ainsi, la localisation des ménages et des emplois génère des déplacements qui sont affectés sur le réseau multimodal de transport. Les coûts généralisés de transport sont en retour injectés dans l'expression de l'utilité. Les disponibilités foncières et le réseau de transport sont modifiés à chaque horizon temporel. Le modèle calcule donc à chaque horizon, la localisation des ménages et des emplois, l'évolution du prix du foncier, les déplacements et leurs affectations par mode sur le réseau. Le modèle est composé de deux parties distinctes qui interviennent successivement : la partie usage du sol et la partie transport. Dans la partie usage du sol, les acteurs économiques de l'agglomération se localisent de manière à équilibrer l'offre et la demande de travail et de service avec pour stratégie de minimiser leurs frais de transport et de loyer. De cette localisation résultent des échanges économiques spatialisés qui se traduisent sous forme de matrice origine/destination. Une interface est assurée qui permet de transformer les flux économiques qui résultent de la partie usage du sol en flux physiques qui seront affectés sur le réseau. Dans la partie transport, les matrices O/D ainsi générées, sont affectées sur le réseau. Pour chaque couple O/D, une désutilité de transport est calculée, prenant en compte les coûts généralisés sur chaque arc et pour chaque mode. Cette désutilité de transport est ensuite prise en compte dans la stratégie de localisation des acteurs dans la partie usage du sol de la séquence suivante. Le modèle est pseudo-dynamique. A la séquence $n+1$, les acteurs se localisent en fonction de l'état du réseau à la séquence n , et l'affectation se fait sur le réseau à la séquence $n+1$. Le modèle donne donc à chaque horizon temporel, les valeurs foncières par type de surface et type de zones, la localisation des emplois et des ménages sur chaque zone et les déplacements.

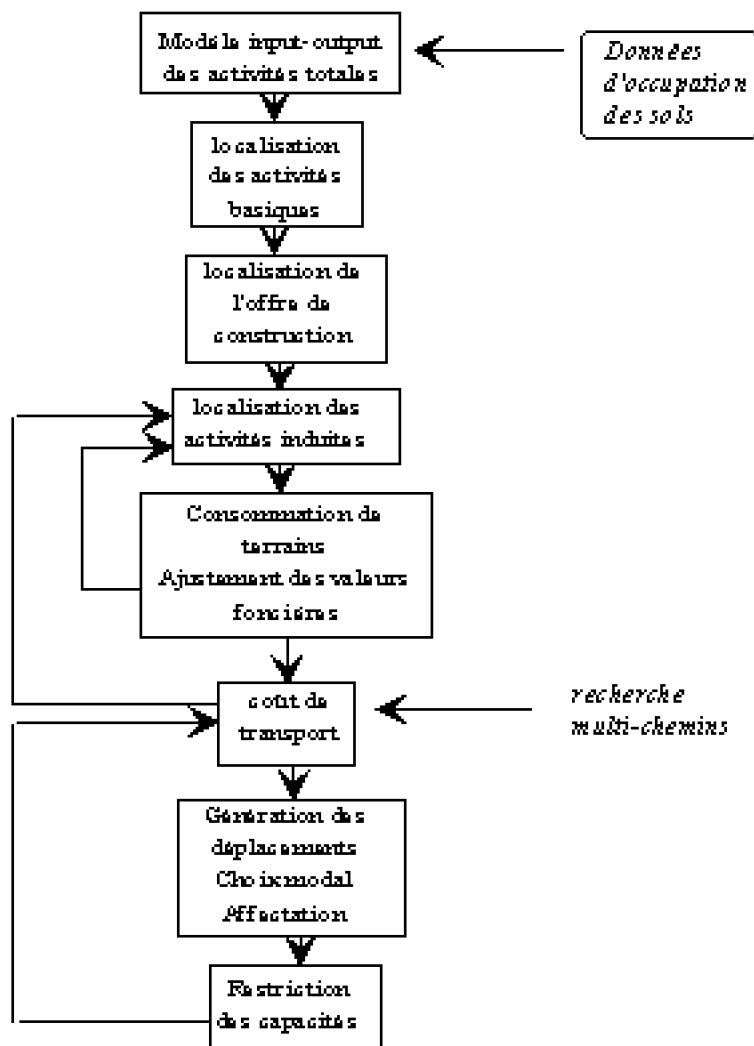


Figure 3-6. Structure générale du modèle TRANUS

4112. Les fondements théoriques

Le modèle TRANUS intègre plusieurs techniques de modélisation et fondements théoriques : la théorie de la base, les techniques des modèles comptables spatiaux d'entrées-sorties, les techniques de la maximisation de l'utilité (utilité aléatoire et choix discrets), les fonctions d'enchères fondées sur la théorie d'Alonso et l'équilibre de l'offre et de la demande par les prix. Il s'agit d'un modèle très complet, mais difficile à calibrer. Pour pouvoir être appliqué, ce modèle nécessite de disposer des bases de données complètes pour l'année de base.

4113. Les calculs de l'occupation des sols

Le contenu de la partie usage des sols peut se décomposer en trois grands éléments : théorie de la base, matrice input/output de Léontieff, localisation des secteurs économiques par équilibre de l'offre et de la demande.

a. La théorie de la base

Les activités économiques d'une aire urbaine sont distinguées en activités basiques et activités induites. Les activités basiques sont les activités exportatrices par rapport à l'aire d'étude, elles sont considérées comme exogènes au modèle. Les activités induites, *a contrario*, sont générées par la présence des activités basiques. La population employée dans ces activités s'installe dans l'agglomération ce qui entraîne l'installation d'activités induites comme des activités de services aux particuliers. Dans le modèle, les activités basiques sont donc exogènes et leur croissance est une donnée. Les activités basiques sont le moteur de la croissance économique de la zone d'étude.

b. La matrice input/output de Léontieff et les secteurs économiques

Le système d'activités est représenté par un modèle comptable spatial d'entrées-sorties (input/output). A partir d'une segmentation des secteurs économiques est définie la matrice de leurs échanges, ce qui constitue la matrice input/output. Ce modèle a la particularité d'être reformulé selon les principes de la théorie de l'utilité aléatoire. Comme dans le modèle entrées-sorties classique, une distinction doit être faite entre les secteurs de demande finale et les secteurs intermédiaires. Trois grands secteurs économiques sont distingués : les activités économiques (les employeurs que l'on classe par type d'activités), les ménages (les employés que l'on classe par type de revenus) et les terrains (par type de sol : résidentiel, industriel, *etc.*). Tous ces secteurs économiques se « consomment » mutuellement. L'industrie « consomme » des ménages qui consomment des services et du terrain. Les activités de services consomment des ménages et du terrain, *etc.* Ces consommations d'input forment la matrice input/output. Un prix d'équilibre régit la consommation de ces secteurs.

Ces activités engendrent un certain nombre de relations fonctionnelles. Le modèle du système d'activités génère ainsi les flux fonctionnels entre les différentes activités constituant la structure économique urbaine. Ces flux fonctionnels X_{ij}^{mn} sont estimés à

partir d'un modèle entrées-sorties logit multinomial de la forme suivante :

$$r X_{ij}^{mn} = r-1 X_i^m a^{mn} \frac{\exp(-\beta^n V_{ij}^n)}{\sum_j \exp(-\beta^n V_{ij}^n)}, \quad \rightarrow \quad \rightarrow \quad (3-1)$$

où $r X_{ij}^{mn}$ représente le nombre d'activités d'un secteur n dans la zone j générée par l'activité m dans la zone i , r représente le nombre d'itérations. Les coefficients a^{mn} , qui peuvent être considérées comme des mesures de l'interaction spatiale, sont des données exogènes.

Le modèle distingue la demande des secteurs basiques et celle des secteurs induits. La fonction d'utilité peut adopter plusieurs formes. Dans le cas de la localisation des activités, la forme suivante est proposée :

FORM302

c_{ij}^n est le coût composite de transport,

r_j est la valeur du terrain en j ,

et τ^n est le paramètre régulant l'effet de la valeur foncière sur la localisation de l'activité n , qui est combiné avec β^n , pour l'effet du coût composite des transports. Cela implique que les valeurs foncières exercent une attraction négative sur les activités parce qu'elles imposent un coût plus élevé à la localisation des logements et des firmes.

La structure générale du modèle d'activités peut être présentée ainsi :

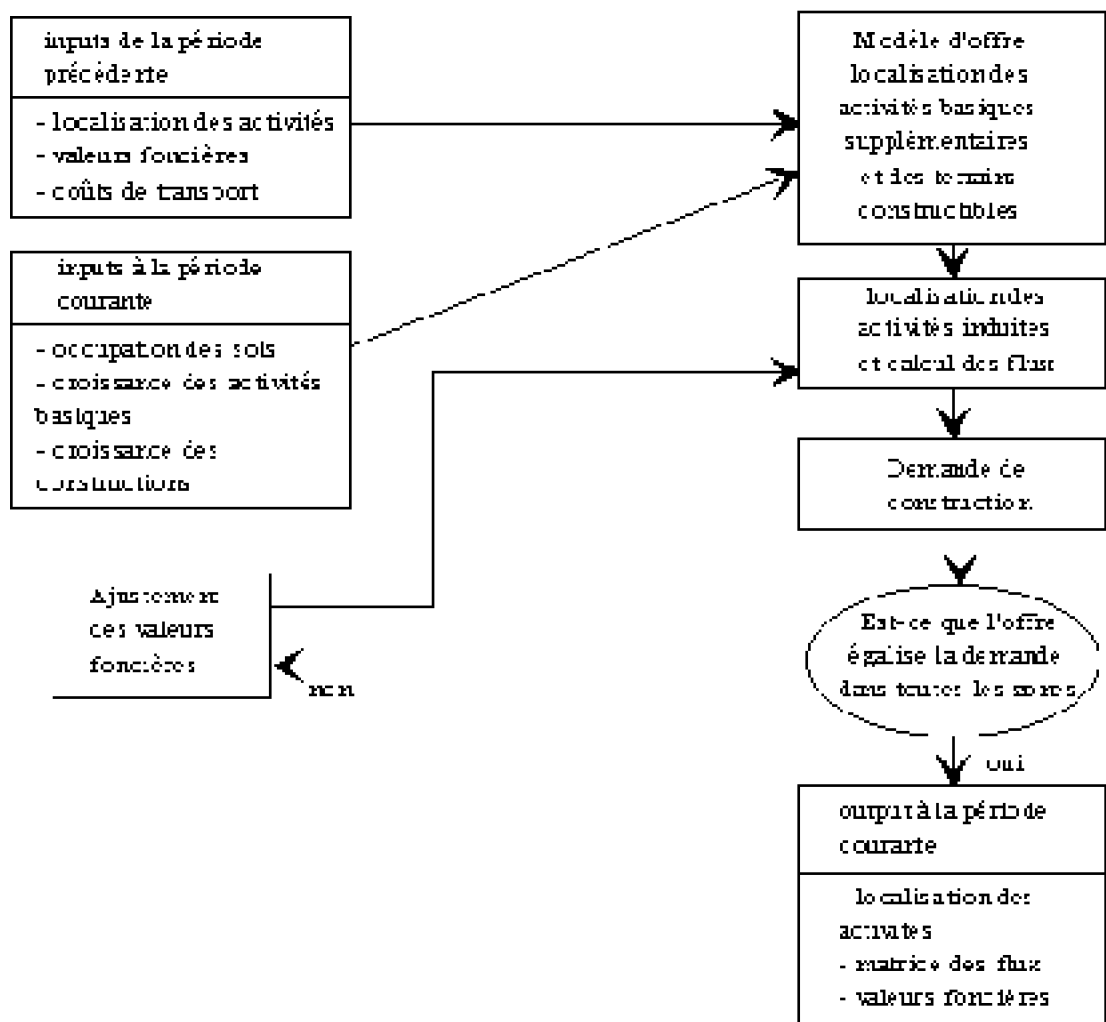


Figure 3-7. Structure du modèle d'activités

Source : De la Barra, 1989.

Les inputs en référence de la période précédente sont : la localisation des activités, les valeurs foncières, les coûts composites des transports. Les inputs de la période courante sont le montant de sol dans chaque zone, la croissance nette des activités et des constructions entre la période précédente et la période courante. Avec ces informations, la première étape de calcul est la détermination de la localisation des activités basiques supplémentaires et les constructions supplémentaires dans les zones. Cet incrément, qui peut être positif ou négatif, doit être ajouté aux valeurs de la période précédente, pour obtenir les totaux courants qui doivent être considérés comme fixés. La localisation de l'incrément des emplois basiques peut être estimé avec un simple modèle de probabilité mais la distribution de l'incrément des constructions doit introduire d'autres variables. Une fois que le nombre d'activités basiques et le niveau de construction dans chaque zone a été déterminé, le processus de localisation en itération peut être appliqué pour déterminer la localisation des activités induites.

Ce modèle produit également des flux entre chaque paire d'activités. Une fois que toutes les activités ont été localisées, la demande totale pour les constructions peut être estimée dans chaque zone avec une fonction de demande de sol constructible adaptée. La demande de sol, \hat{F}_j , peut être alors comparée à l'offre fixe courante de sol F_j . Si la

demande est plus forte que l'offre, les valeurs foncières vont augmenter. Le mode d'ajustement peut être présenté ainsi :

$$\sigma+1 r_j = \sigma r_j \frac{\hat{F}_j}{F_j}, \quad \rightarrow \quad \rightarrow \quad \rightarrow \quad (3-3)$$

où σ représente le nombre d'itération. Le processus est itératif jusqu'à ce que $F_j \square \hat{F}_j$, c'est-à-dire jusqu'à ce que la demande et l'offre se rapprochent dans chaque zone.

Les outputs du modèle sont la localisation des activités dans chaque zone, l'offre de terrain, les valeurs foncières, et un ensemble de matrices X_{ij}^{mn} , représentant les

relations entre chaque secteur et région. Dans le modèle de transport, ces flux sont utilisés comme base de calculs de la demande de transport. Le modèle d'activités peut être appliqué aussi bien à un espace régional qu'à un espace urbain.

c. La localisation des secteurs par l'équilibre de l'offre et de la demande

Les secteurs économiques échangent des biens, ce que représente la matrice input/output. Pour être complet, le modèle doit localiser les secteurs et spatialiser les échanges.

Les données de croissance des activités basiques et la matrice input/output permettent de calculer la demande globale pour chaque secteur économique sur l'ensemble de l'aire d'étude. Les secteurs se répartissent sur les différentes zones à partir

de l'utilité qu'ils ont à s'y installer.

Chaque échange économique entre les secteurs génère un ou des déplacements. Le modèle d'usage des sols permet d'établir une matrice O/D de déplacement qui est affectée dans le modèle de transport.

4114. Les calculs dans le modèle de transport

Le module de génération est une interface fondamentale avec le système d'activités et le système de transport. La fonction de ce module est de transformer les flux fonctionnels issus du modèle d'activités en déplacement, en prenant en considération les coûts généralisés de déplacement. En d'autres termes, on peut le considérer comme une fonction de demande élastique par rapport aux coûts de déplacement. La fonction de demande de déplacement est la suivante :

$$T_{ij}^n = X_{ij}^n [a^n + b^n \exp(-\beta^n c_{ij}^n)] \rightarrow \rightarrow (3-4)$$

où T_{ij}^n est le nombre total de déplacements générés à partir de i à j par les catégories socio-économiques n et X_{ij}^n sont les flux fonctionnels produits par le modèle de système d'activités. Le paramètre a^n est le nombre minimum que génère une activité de type n , et $a^n + b^n$ est le maximum. Le nombre de déplacements décroît de $a^n + b^n$ à a^n de façon exponentielle, avec une pente β^n lorsque les coûts généralisés de déplacements c_{ij} augmentent.

Le modèle de transport est constitué d'un modèle logit hiérarchique choix de mode / choix d'itinéraire combiné. Le réseau de transport est multimodal. Les utilités de transport pour chaque mode et chaque itinéraire s'expriment sous forme de coûts généralisés, de manière classique.

L'affectation par un modèle logit se fait sur un nombre d'itinéraire imposé par l'utilisateur. La recherche d'itinéraire se fait sur les arcs à vide : les n itinéraires les plus courts sont déterminés. L'affectation se fait ensuite avec contrainte de capacités sur ces itinéraires. Les coûts et les désutilités de transport sont ensuite utilisés dans le modèle d'usage des sols de la séquence suivante. Les coûts de transport interviennent dans le coût de production des outputs. La désutilité de transport intervient dans la fonction de localisation.

412. Des exemples d'application du modèle TRANUS

Le modèle TRANUS a été beaucoup appliqué en Amérique Latine, aussi bien pour évaluer des politiques d'urbanisation, que des politiques de développement régional ou encore des politiques de transport à une échelle urbaine ou régionale, et enfin il a produit des évaluations environnementales.

Concernant les applications à l'évaluation de politique d'urbanisation, le modèle a été appliqué à l'île de Curaçao et à sa principale ville, Willemstad (147 388 habitants en 1981) afin d'évaluer un plan de développement urbain. Le principal objectif de la simulation était de définir le lieu où le projet de développement urbain devait être privilégié. Le modèle a également été appliqué, dans un objectif proche de celui de Curaçao, à l'aire urbaine de

La Victoria au Venezuela (108 975 habitants en 1981).

Le système TRANUS a été également utilisé afin d'évaluer des politiques de transport. Ainsi, il a été utilisé pour évaluer l'opportunité de l'extension de la ligne de métro à Caracas (4,5 millions d'habitants en 1981). L'aire métropolitaine de Caracas est caractérisée par une densité élevée de logements, une forte concentration d'emplois administratifs et tertiaires, et un réseau routier comportant peu d'autoroutes. Ces caractéristiques combinées avec des taux de motorisation élevés, des prix des carburants faibles, ont conduit à une situation des transports urbains fortement congestionnée. Un système de métro était existant, mais devenait insuffisant devant le phénomène de croissance de la population aux franges de l'agglomération, c'est-à-dire dans des vallées localisées de 20 à 50 kilomètres de la zone centrale, et séparées par des montagnes. La Compagnie de métro de Caracas a décidé d'étudier l'opportunité de la construction d'une ligne de métro connectant Caracas à Los Toques, une des aires périurbaines. Le modèle TRANUS a été appliqué sur la base d'un découpage de l'aire métropolitaine élargie en un nombre restreint de macro-zones. Deux scénarios ont été testés sur la base d'une seule hypothèse de croissance : avec et sans le métro.

TRANUS a également été utilisé, sur la même aire métropolitaine de Caracas, pour tester l'opportunité de la construction d'un monorail entre le centre de Caracas et une zone au Sud-Est. Un ensemble de scénario a été testé.

Le système TRANUS a été également appliqué pour évaluer des projets de transport régionaux, par exemple, le projet de l'autoroute Caracas-La Guaira. Caracas est relié à la côte grâce à une autoroute à double voies. Le long de la côte, il y a un fin ruban de terrain situé entre la montagne et la mer. Cette aire est densément occupée et remplit plusieurs fonctions. Le principal port et l'aéroport du Venezuela sont localisés dans ce lieu, et il y a de nombreux équipements récréatifs et la présence de résidences secondaires. Du fait de la proximité de Caracas, des zones périurbaines se sont également développées. Cela engendre des déplacements pendulaires, et au total, une forte croissance des déplacements sur l'autoroute. Pendant les week-end, en particulier, les voyageurs sont pris dans de longues files d'attente. L'autoroute de Caracas-La Guaira présente également de nombreux inconvénients physiques, notamment des glissements de terrain, ce qui accroît ses coûts de maintenance, en partie compensés par un système de péage. Plusieurs projets alternatifs ont été élaborés allant de la construction d'une nouvelle autoroute à la mise en service d'une ligne de chemin de fer.

En outre, le système TRANUS a été utilisé pour évaluer le système ferroviaire du Venezuela. Enfin, ce système a également pu être employé pour évaluer différents scénarios de consommation d'énergie en relation avec des politiques d'urbanisation et de transport.

Dans de nombreux cas, les résultats de TRANUS ont été utiles à la planification.

42. le modèle 5-LUT de Martinez

L'intérêt du modèle 5-LUT développé par Martinez¹⁵ est son apport théorique. Ce modèle propose en effet un nouveau type de modèle d'occupation des sols, fondé sur la théorie dite du « Bid-choice », qui est capable de s'intégrer de façon cohérente et complète avec

un modèle de transport.

421. Les objectifs du modèle 5-LUT

Le modèle proposé par Martinez est un modèle intégré à cinq étapes de localisation et de transport (5-LUT)¹⁶. Il est composé de deux sous-modules ayant une structure commune : un module qui décrit le mode d'occupation des sols, modèle de « Bid-choice », incluant les mécanismes de localisation et de rente, et un module de transport comportant les quatre étapes classiques des modèles standards (ESTRAUS).

L'hypothèse principale du modèle 5-LUT suppose que l'agent économique prend des décisions cohérentes de localisation et de transport dans l'objectif de maximiser son utilité ou profit. Ainsi, les agents se localisent dans l'espace dans l'objectif de maximiser leur utilité (dans le cas des ménages) ou leur profit (dans le cas des firmes) en tenant compte du niveau d'accessibilité des lieux. Dans le modèle, les mesures d'accessibilité sont définies comme la révélation des préférences pour le transport, c'est-à-dire qu'elles ont des interprétations directement économiques. De façon structurelle, les choix de transport et les valeurs du temps associées sont nécessairement cohérents avec les choix de localisation de l'agent. Pour Martinez, la relation entre le système de transport et l'urbanisation peut être décrite par un mécanisme économique de cause à effet en opposition à la relation mise en avant par les modèles d'interaction spatiale fondés sur l'interaction de facteurs physiques. L'avantage de la prise en considération d'une structure économique est qu'elle est fondée sur les décisions des individus c'est-à-dire sur la description des comportements individuels comme le résultat de leurs préférences.

422. La modélisation du système urbain d'activités

4221. Le système économique urbain

La ville a une structure d'activités, caractérisée par leur distribution dans l'espace, qui est le résultat d'un certain nombre de processus qui interviennent à différents stades de son développement. Cependant, dans le domaine de l'analyse, le problème est de prévoir le développement futur le plus probable de la ville. Pour ce faire, le modèle concentre son intérêt sur les décisions de chaque activité, ménage ou entreprise, confronté au problème de la détermination de sa localisation dans l'espace urbain, c'est-à-dire modélise les décisions des individus. L'auteur considère que puisque la localisation d'une certaine activité va modifier d'une manière ou d'une autre la ville, les choix de localisation individuels devront inévitablement affecter les autres décisions sous la forme d'économies externes de localisation. Cela signifie que les choix de localisation des individus sont interdépendants, ainsi c'est seulement à partir d'une analyse jointe que l'on peut définir la demande de localisation. L'hypothèse économique des comportements des individus est

¹⁵ Dans le chapitre précédent, les travaux de Martinez concernant l'interaction transport-urbanisation par le biais de la notion de l'accessibilité ont été présentés.

¹⁶ Le modèle de Martinez a été calibré sur la ville de Santiago (Chili).

la décision rationnelle, c'est-à-dire que l'on suppose qu'ils maximisent leur utilité individuelle. Cependant, contrairement aux autres biens économiques, l'espace urbain est considéré comme quasi-unique, puisque sa localisation est associée à un environnement très spécifique qui est seulement comparable à des espaces très proches. Ainsi, une parcelle de terrain donnée a une valeur directement associée à sa localisation relative dans la ville par rapport à celles des autres activités. Martinez fait référence au processus d'enchères foncières à la Alonso.

Le cadre théorique du modèle s'appuie sur plusieurs dimensions : La théorie des choix discrets dérivée de la théorie micro-économique du comportement individuel (théorie de l'utilité aléatoire), la théorie du surplus économique, et la loi des rentes d'enchères de Alonso-Fujita. L'hypothèse essentielle est que l'agent économique est un être rationnel et qu'il prend des décisions cohérentes dans l'objectif de maximiser son utilité (ou son profit). Les ménages et les entreprises sont des entités rationnelles qui cherchent à maximiser leur avantage net ; ils exécutent des activités (résidentielles, industrielles, commerciales...). Chaque agent possède une fonction d'utilité (ménage) ou de profit (entreprise). Cette utilité est définie comme une variable aléatoire. Les agents ont besoin d'échanger les uns avec les autres. Dans la mesure où ils sont dispersés dans l'espace, les échanges sont rendus possibles par des déplacements. Les choix de localisation et les choix de déplacements doivent conjointement maximiser l'utilité des agents après avoir considérés toutes les alternatives offertes.

Les déplacements sont ainsi effectués dans l'objectif de « prendre contact » ce qui justifie l'importance de la notion d'accès. L'accès peut alors être défini comme l'avantage économique dérivé de l'interaction entre deux activités, qui est l'avantage net obtenu par la prise de contact avec les autres activités moins le coût d'interaction (le coût de transport). La notion d'accès recouvre deux dimensions. La première renvoie à l'accessibilité. C'est l'avantage obtenu par l'individu qui se déplace vers certaines opportunités. Elle est perçue directement par la personne qui se déplace. La seconde est l'attractivité. Il s'agit de l'avantage obtenu « en étant visité » par d'autres activités.

La description des mécanismes d'occupation des sols et en particulier le marché des sols urbains passe par une démarche particulière synthétisant l'approche classique de l'équilibre spatial à la Alonso, avec les règles de la plus forte enchère (best-bidder), et la théorie des choix discrets (utilité aléatoire). Martinez dénomme cette synthèse théorique par « Bid-choice theory ». Le concept d'offre d'enchère est remplacé par le principe plus opérationnel du consentement à payer pour un logement localisé en un endroit donné. Le principe de maximisation de l'utilité est substitué par celui de la maximisation du surplus du consommateur procuré par ses choix de localisation. L'équilibre spatial intervient lorsque la localisation des activités remplit les deux conditions suivantes :

1.
Chaque consommateur se localise à un endroit qui maximise son surplus étant donné les prix, c'est-à-dire qu'il choisit la meilleure alternative possible de localisation. La recherche de la maximisation de son surplus le conduit à maximiser la différence entre son consentement à payer et le prix du terrain.

2.

Les prix sur le marché des sols sont fixés par la règle de la plus forte enchère. Le terrain est affecté à celui qui dispose du consentement à payer le plus important.

Le consentement à payer, défini comme une variable aléatoire, est fonction d'un vecteur d'attributs relatifs aux caractéristiques du terrain, aux caractéristiques socio-économiques du ménage, mais aussi à l'accessibilité et l'attractivité de la zone.

4222. La théorie du Bid-choice

Martinez propose de combiner deux approches à savoir la théorie des enchères à la Alonso et l'approche de l'utilité aléatoire. L'auteur est conduit à dériver une nouvelle version du modèle de maximisation de l'utilité qui est fondée sur la propension à payer du consommateur pour un lot de terrain et remplace les hypothèses de maximisation de l'utilité par son équivalent à savoir la maximisation du surplus du consommateur engendré par les choix de localisation. Ce modèle théorique se focalise sur l'analyse de l'usage des sols, qui est spécifiquement en relation avec la localisation, en opposition au problème de la propriété. La principale conclusion de l'analyse théorique du bid-choice est que l'équilibre de l'usage des sols peut être décrit par deux éléments :

le premier est le consentement à payer pour un terrain par un ménage ou une firme, noté WP . La fonction de WP est définie comme le prix maximum que le consommateur accepte de payer pour une localisation donnée.

le second, renvoie à des lois de comportements des consommateurs et des offreurs, qui sont résumés par la règle du best-bid (meilleure enchère).

Le surplus de l'usager (CS) est défini comme la différence entre WP et le prix du marché p . Le choix optimal est celui qui maximise CS .

Le modèle d'occupation des sols est un modèle d'équilibre. Cet équilibre est obtenu en résolvant le système d'équation des comportements du consommateur et du propriétaire. En utilisant l'indice h pour les consommateurs ($h \leq H$) et i pour les lots de terrain ($i \leq S$), le système est le suivant :

consommateur

$$\text{Max}_{i \in S} CS_{hi} = \text{Max}_{i \in S} (WP_{hi} - p_i) \quad (3-5)$$

propriétaire

$$p_i = \text{Max}_{g \in H} (WP_{gi}) \quad (3-6)$$

La solution du système est obtenue en remplaçant p_i (3-6) dans l'expression (3-5) :

$$\text{Max}_{i \in S} CS_{hi} = \text{Max}_{i \in S} (WP_{hi} - [\text{Max}_{g \in H} (WP_{gi})]) \quad (3-7)$$

Ceci représente le modèle d'équilibre foncier.

La recherche du surplus maximum du consommateur conduit à une localisation où le consommateur propose l'enchère la plus forte.

On suppose que le consentement à payer de l'individu h pour le lot de terrain i , WP_{hi} , dépend d'un vecteur z qui contient n éléments qui sont des attributs du lot (Rosen, 1974). Ainsi, WP peut être notée comme suit :

$$WP_{hi} = WP_h(Z_{h1i}, Z_{h2i}, \dots, Z_{hni}) \quad (3-8)$$

En outre, WP est défini comme une variable aléatoire :

$$WP_h(Z) = WP_h(Z) + \varepsilon_h \quad (3-9)$$

On suppose que la fonction de consentement à payer WP suit une distribution stochastique de Weibull. La probabilité qu'un lot de terrain i donné soit associé à la plus forte enchère du consommateur h est exprimée par le modèle logit multinomial :

$$P_{h/i} = \frac{\exp[\mu WP_{hi}]}{\sum_{g \in H} \exp[\mu WP_{gi}]} \quad (3-10)$$

En outre, le prix de marché attendu pour un terrain p_i est par définition égale à l'offre d'enchère maximum des acheteurs potentiels, qui est donnée par :

$$p_i = (1/\mu) \ln \left\{ \sum_{g \in H} \exp[\mu WP_{gi}] \right\} \quad (3-11)$$

La probabilité qu'un consommateur donné h choisisse le lot i est estimée en utilisant le modèle logit multinomial :

$$P_{i/h} = \frac{\exp[\mu(WP_{hi} - p_i)]}{\sum_{j \in S} \exp[\mu(WP_{hj} - p_j)]} \quad (3-12)$$

423. La modélisation du système des transports

Le système de transport est décrit selon les quatre étapes classiques. Ainsi, à partir d'une origine donnée, établie par le modèle de localisation, les choix que doit effectuer le

consommateur sont : la fréquence et les motifs de déplacements, la destination du déplacement, le choix du mode de transport, le choix de l'itinéraire. Chacune de ces décisions se prend en fonction des caractéristiques de l'offre du service de transport et le résultat définit ainsi la demande ou niveau d'usage du transport (l'équilibre sur le réseau de transport obéit au principe de Wardrop). Le résultat du modèle de transport est de fournir les coûts de transport et permet de calculer l'accessibilité et l'attractivité. En effet, pour un déplacement donné, l'accès dépend de la valeur que le consommateur attribue à chaque destination, la disponibilité des activités, et les coûts de transport.

Le système de transport est envisagé par le consommateur qui recherche une localisation comme un attribut du site, ce qui est intuitivement facile à associer à deux concepts distincts :

l'accessibilité (*acc*) qui est une mesure de l'avantage relatif dans la recherche d'activités localisées ailleurs que sur le site choisi ;

l'attractivité (*att*) qui est une mesure du profit économique potentiel des entreprises engendrées par l'arrivée de voyageurs.

Ces deux mesures de surplus dérivent des schémas de déplacements et sont définis pour un motif et une période de temps donnée, et pour un individu de type h :

$$\Delta acc_i^{hp} = - \sum_j \left[\int_{c_{ij}^{hp1}}^{c_{ij}^{hp2}} T_{ij}^{hp} dc_{ij}^{hp} \right] \quad (3-13)$$

$$\Delta att_j^{hp} = - \sum_i \left[\int_{c_{ij}^{hp1}}^{c_{ij}^{hp2}} T_{ij}^{hp} dc_{ij}^{hp} \right] \quad (3-14)$$

avec T_{ij}^{hp} le modèle de distribution de déplacement pour le motif et la période p et pour les usagers de type h , et c_{ij} le coût de déplacement.

Les mesures de l'accès, *acc* et *att*, peuvent être envisagées comme les perceptions des individus de l'accès dans le modèle d'occupation des sols.

La demande de déplacements dépend des éléments suivants : a) la disponibilité et le niveau d'activité que les usagers peuvent trouver à chaque destination alternative, b) le coût du transport pour établir le contact pour chaque activité, par destination, mode et itinéraire, c) l'utilité obtenue par l'utilisateur du contact avec les autres activités.

A partir du modèle de demande de transport sont spécifiées des mesures de surplus ou d'accès. L'accessibilité mesure le bénéfice net obtenu par l'utilisateur pour l'activité qui génère le déplacement. L'attractivité est le bénéfice obtenu par les activités visitées. Ces

mesures de l'accès ont la propriété de synthétiser le système d'offre de transport selon la perception de chaque type d'utilisateur et selon les localisations spécifiques.

424. L'interaction entre le système d'activités et le système des transports

Le modèle de « bid-choice » considère le transport comme un attribut de la fonction de consentement à payer du sol. Les attributs des sols peuvent être présentés comme un vecteur :

$$Z_{hi} = (Z_{h1i}, Z_{h2i}, \dots, acc_{hi}, att_{hi}) \rightarrow \rightarrow (3-15)$$

où Z_{hki} désigne l'attribut k perçu par le consommateur de type h , pour le lot de terrain i .

Ainsi, la fonction de consentement à payer peut s'écrire :

$$WP_{hi} = WP(z_1, \dots, z_n, acc_{hi}, att_{hi}) \rightarrow \rightarrow (3-16)$$

avec z_h l'ensemble des attributs autres que l'accès.

Ainsi puisque acc et att sont sensibles aux changements des conditions de transport, le projet de transport va induire des changements dans les fonctions de consentement à payer pour les sols WP qui auront en retour des impacts sur la localisation spatiale des activités et sur les prix fonciers. Ces changements dans l'occupation des sols affectent à leur tour le modèle de déplacement. Les mesures de l'accès sont ainsi les vecteurs de transmission des informations entre le système des activités urbaines et le système de transport.

Le système d'activités et le système de transport interagissent de la façon suivante : la confrontation de l'offre de transport et de la demande de transport définit les coûts généralisés des contacts entre les activités. Ces coûts de transports modifient donc les conditions d'accès dans la ville. Or, dans la mesure où les indices d'accès entrent dans les attributs du consentement à payer et donc dans les mécanismes de prix et de choix de localisation, ceci a des conséquences sur l'organisation spatiale des activités. Les mesures d'accès sont donc le vecteur de transmission des informations entre le système d'activités et celui de transport, de façon cohérente avec les comportements des consommateurs. Ainsi, puisque les mesures d'accessibilité et d'attractivité sont sensibles aux changements du système de transport, les modifications de coûts de transport vont induire des changements dans la fonction de consentement à payer des individus et donc des modifications dans les prix fonciers et la localisation spatiale des activités. Ces changements dans l'occupation des sols affectent en rétroaction le modèle de transport puisque la population et les activités attractives sont modifiées dans chaque zone. Une nouvelle itération du modèle est alors nécessaire et ainsi de suite.

La figure 3-9 schématise les interactions et les mécanismes modélisés. Dans la partie supérieure de la figure, apparaissent les variables d'état qui décrivent le système de la ville et peuvent avoir une interprétation économique : les coûts de transport, c_{ij} ; le consentement à payer pour un terrain i , WP_i ; et les prix fonciers de cette zone i , p_i . Dans la partie inférieure de la figure, sont décrites les variables physiques, comme la

localisation des activités dans chaque zone (a_j) et la demande de déplacement par destination, par mode et par itinéraire (V_{hijr}). La séquence de flèches et de variables décrit le mécanisme d'interaction. Cette figure représente les deux conditions de l'équilibre du système :

- L'équilibre du marché des sols, qui est régulé par le mécanisme de la meilleure enchère (best-bidder),

- L'équilibre du réseau de transport qui est régulé par les conditions de Wardrop.

La figure représente également l'existence de circuits ou de boucles d'impacts :

- La localisation des activités (a_j) affecte le consentement à payer pour les sols en modifiant les caractéristiques de voisinage de la zone (niveau socio-économique, par exemple), qui en retour a un impact sur les rentes foncières, ce qui peut modifier les localisations des activités.

- La localisation des activités (a_j) affecte la structure de la mesure d'accès (acc , att), qui en retour altère le consentement à payer des sols et l'occupation des sols. Cette boucle révèle l'équilibre complexe du marché des sols.

Cette figure montre aussi le rôle central des variables d'accès dans l'interaction transport/occupation des sols.

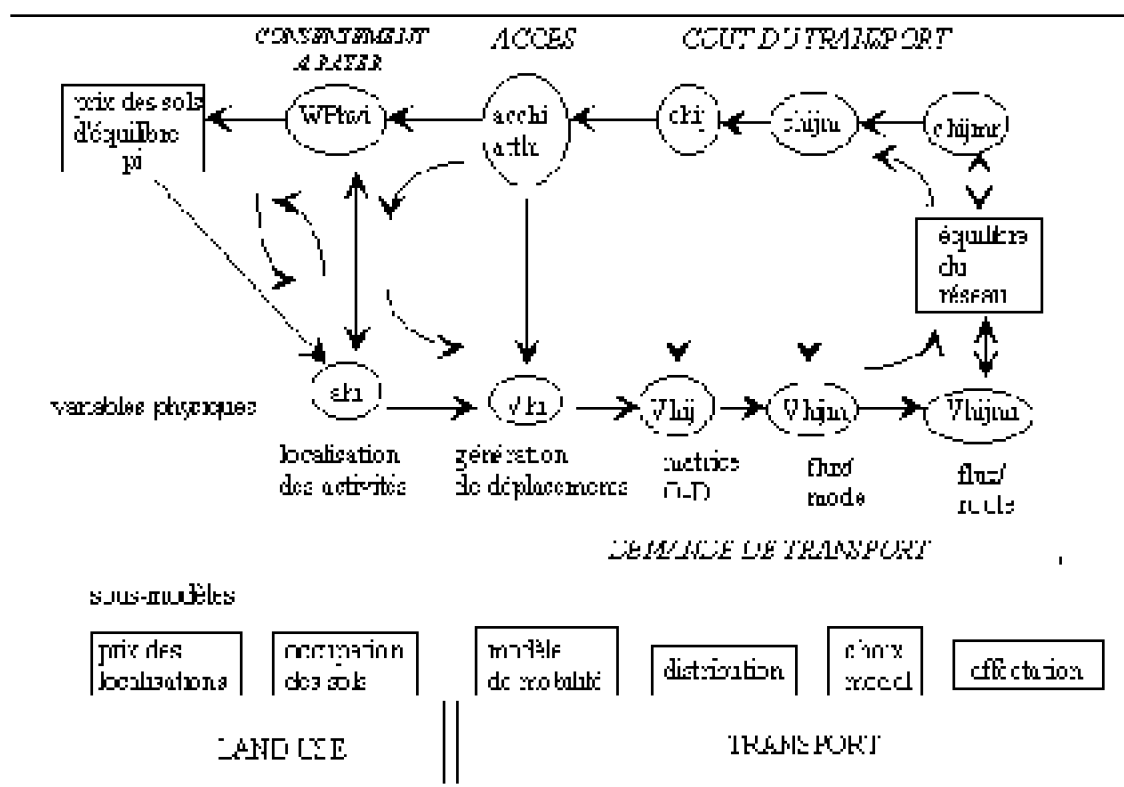


Figure 3-8 - L'organisation des interrelations dans le modèle de Martinez

Conclusion

Les modèles interactifs de transport et d'urbanisation ont pour objectif de simuler l'interaction existant entre le système de transport et celui des localisations. Depuis les premières tentatives, ces modèles ont beaucoup évolué notamment en ce qui concerne leur solidité théorique. L'évaluation de ces modèles ne parvient pas à une conclusion unanime, le bilan reste relativement mitigé. Il est indéniable que ces modèles doivent faire encore l'objet de perfectionnement. Toutefois, l'intérêt et la méthodologie de ces modèles ne sont pas remis en cause. L'apport de cette approche à la problématique des modèles de prévision de la demande de transport ne peut pas être négligé, notamment dans leur possibilité d'intégrer l'évaluation des effets sur l'environnement. Les modèles interactifs de transport et d'occupation des sols présentent ainsi un véritable défi et une entreprise difficile.

Notre objectif n'est cependant pas de transposer un de ces modèles existants mais d'élaborer un modèle interactif de déplacement répondant à notre problématique. Toutefois, l'architecture générale, les principes et techniques de modélisation s'inspireront de certains de ces modèles.

PARTIE 2. Développement d'un modèle interactif de déplacements urbains

Chapitre 4. Le contexte et la donne

Introduction

Ce chapitre a pour objectif de présenter dans le même temps la donne sur laquelle s'appuiera la construction du modèle et le contexte d'évolution du système des déplacements et des localisations sur l'agglomération lyonnaise, zone d'étude retenue.

1. La problématique de la reconstitution de la donne

La donne est l'ensemble des données issues d'une investigation qui se veut rigoureusement organisée (Bonnaïfous, 1989). La constitution de la donne est un élément central de tout travail de modélisation. En effet, celle-ci se doit d'être cohérente avec le modèle *a priori* et en permettre la construction. La construction du modèle et la constitution de la donne sont interdépendantes et le modèle final résulte d'un équilibre obtenu à la suite d'un processus itératif entre les deux, équilibre fonction de la

problématique du modèle (Schéou, 1997). Schéou rappelle qu'il existe deux alternatives pour le recueil des données. Le cas idéal est de recueillir les informations en procédant à des enquêtes statistiques. Le chercheur peut ainsi constituer une donnée originale adaptée au modèle qu'il veut construire. Les difficultés dans ce cas de figure se situent au niveau de l'élaboration du questionnaire. La deuxième alternative consiste à organiser la donnée à partir de la réunion d'informations existantes et disponibles. Les difficultés associées à ce mode de recueil sont alors considérables car « les contraintes pesant sur le modèle sont plus nombreuses et le numéro d'équilibriste du chercheur plus périlleux ». Notre démarche se situe dans ce dernier cas.

2. Le périmètre d'étude retenu

Le préalable à toute constitution de la donnée est la détermination des zones spatiales et temporelle sur lesquelles porteront les informations. Délimiter le périmètre d'étude est une opération délicate. Les choix dépendent en grande partie de la vision du chercheur et ont une influence certaine sur l'étude elle-même. Le périmètre d'étude est directement en relation avec l'objet du modèle. Limiter l'étude des déplacements de personnes aux seuls espaces urbains n'est plus pertinent dans la mesure où les échanges entre les espaces périphériques des grandes agglomérations et les espaces plus urbanisés sont en forte progression. Ces espaces étant désormais établis comme des espaces à enjeu, il est indispensable de les intégrer dans l'aire d'étude. Le périmètre d'étude initial est plus vaste que l'agglomération lyonnaise et couvre un rayon de 45 km autour du noyau urbain central (la préfecture de Rhône). Cette zone correspond à ce que l'on pourrait qualifier de zone d'influence de l'agglomération lyonnaise. En outre, sur cet espace, il existe une bonne adéquation entre le nombre d'emplois offerts et le nombre d'actifs résidents occupés.

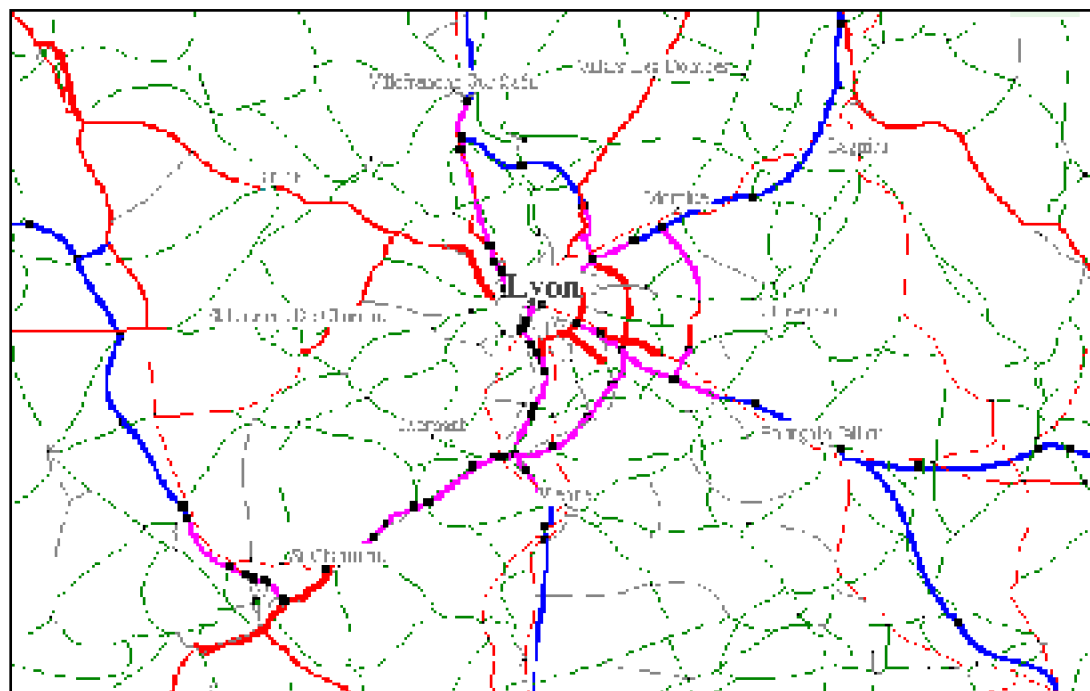


Figure 4-1. Périmètre de la zone d'étude

Ce périmètre d'étude, qui se veut cohérent avec l'objet du modèle, pose un certain nombre de difficultés en termes de recueil de données, notamment en ce qui concerne les pratiques de déplacements. Ces difficultés nous amèneront à considérer deux périmètres distincts d'analyse et de modélisation.

3. Le découpage spatial adopté

Définir un découpage géographique pour un modèle de transport nécessite de concilier un certain nombre de contraintes : disponibilité des données, formes urbaines, typologie socio-économique, coupures physiques, consistance des réseaux, objets des tests à réaliser, etc. On s'est efforcé de rationaliser au maximum cet exercice en appliquant successivement différentes logiques (les cartes illustrant cette démarche sont données en annexe 4-1). La première contrainte est celle des périmètres d'enquêtes. Les enquêtes ménages de déplacements de 1986 et 1995 couvrent le « périmètre du SDAU ». L'enquête de 1976 couvrait en revanche un périmètre plus réduit (annexe 4-1, Carte n°1). Malheureusement, ce périmètre est intermédiaire entre la « première couronne » naturelle et le périmètre du SDAU. Le prendre en compte en plus des autres critères conduirait à une inflation du nombre de zones incohérentes avec la logique du modèle construit. On a donc décidé de s'en affranchir partiellement, quitte à renoncer à exploiter une petite partie des résultats l'enquête de 1976 dans le calage du modèle. La première logique à l'oeuvre dans la constitution du découpage spatial est celle de couronnes, qui correspond plus ou moins aux grands types d'urbanisation (annexe 4-1, Carte n°2). La deuxième logique est celle de bassins versants qui permet de se relier à la fois à la topographie des lieux, à une certaine logique de fonctionnement urbain (aires d'influence des principales communes de première couronne) et aux conditions d'accès au centre de l'agglomération. En tenant compte également des contraintes d'enquêtes, on a retenu huit bassins versants autour de Lyon et Villeurbanne (annexe 4-1, Carte n°3). En croisant l'ensemble des critères précédents, on aboutit à un découpage en 25 zones. Ce niveau de découpage est raisonnable pour un modèle de type stratégique (annexe 4-1, Carte n°5). En ce qui concerne le découpage de l'aire extérieure au SDAU, une logique de bassins versants a été adoptée, respectant les grands corridors d'infrastructures desservant ces bassins. Le reste de l'aire d'étude a été ainsi découpé en 14 zone (annexe 4-1, Carte n°6).

Le système de déplacements (flux de déplacements et offre de transport) et le système des localisations sur l'aire métropolitaine lyonnaise font l'objet d'une qualification. Ainsi, dans un premier temps, le contexte d'évolution des déplacements sur l'agglomération lyonnaise sera rappelé (section 1). Ce travail, préalable à l'exercice de modélisation, a pour objet non seulement de préciser de quelle façon la donne sur les déplacements a été constituée, mais aussi de présenter les grandes tendances d'évolution sur 20 ans, d'identifier les invariants et les variables déterminantes. Dans la mesure où le modèle élaboré se veut être dépendant de l'évolution des localisations urbaines et que l'hypothèse d'une rétroaction du système de transport sur le système des localisations est posée, un examen du développement urbain sur l'aire métropolitaine lyonnaise sera mené (section 2). Cet examen sera l'occasion de souligner la pauvreté des données, notamment en matière de prix, pour qualifier et représenter le mouvement des

localisations urbaines. Enfin, la troisième section aura pour objet de qualifier l'offre de transport, support des déplacements, sur l'agglomération lyonnaise.

Section 1. Le contexte d'évolution du système de déplacements : l'exemple de l'agglomération lyonnaise

Cette section a pour objet dans un premier temps de rappeler les grandes tendances de l'évolution du système de déplacements de personnes en milieu urbain. Dans un deuxième temps, le travail de reconstitution de la donne des déplacements sur l'aire d'étude retenue sera détaillé. Enfin, sur la base de ces données, les déplacements urbains et leur évolution seront présentés.

Depuis une trentaine d'années, l'évolution des déplacements urbains est marquée par un certain nombre de tendances lourdes dans la plupart des grandes agglomérations. Ces tendances sont confirmées sur l'agglomération lyonnaise.

11. Les tendances lourdes de l'évolution des déplacements

Les enquêtes nationales transports fournissent un certain nombre de renseignements sur l'évolution des déplacements urbains et font apparaître des invariants : l'allongement des distances parcourues, la stabilité des budgets temps de transport, la modification de la répartition géographique des flux, une évolution des parts modales favorable à l'automobile.

111. L'allongement des distances parcourues

D'après les enquêtes nationales transports, sur l'ensemble de la semaine, la portée moyenne d'un déplacement local mécanisé est passée de 8,1 km en 1981-1982 à 9,8 km en 93-94. C'est l'augmentation des distances, bien plus que celle du nombre de déplacements, qui donne l'impression que les français sont de plus en plus mobiles. Madre et Maffre (1997) expliquent l'augmentation des distances par plusieurs facteurs : la régression générale de la vie locale, quelque soit le tissu dans lequel on se trouve, au profit de structures concentrées (hypermarchés, complexes multisalles), l'évolution des localisations résidentielles vers les espaces périurbains moins denses, et plus éloignés du centre, la spécialisation des emplois et les passages par le chômage, qui impliquent souvent de chercher du travail sur des bassins d'emplois élargis, alors que la stabilité est plus grande pour la localisation d'un logement dont on est de plus en plus souvent propriétaire et qui constitue un compromis entre les contraintes des différents actifs du ménage. Au total, pour les déplacements locaux, les voyageurs×km mécanisés ont augmenté de 38% et les véhicules×km de 49%. Les écarts se creusent entre les habitants des centres-villes et ceux de la périphérie.

112. La stabilité des durées de déplacements

La durée moyenne d'un déplacement local mécanisé est restée stable à 19 minutes et le budget-temps de transport hebdomadaire correspondant est passé de 4h40 à 5h (il est

resté stable en semaine si l'on inclut la marche à pied). La stabilité des durées et l'accroissement des distances impliquent une augmentation de la vitesse moyenne, qui est passée de 26 à 31 km/h. Madre et Maffre (1997) expliquent cette augmentation d'un cinquième de la vitesse moyenne par : les transferts modaux, notamment par le déclin des modes de proximité (deux roues, etc.), les transferts de réseaux utilisés pour un type de mode donné : passage de l'autobus au métro ou au RER pour les transports publics, passage de la voirie de base aux autoroutes périurbaines pour les automobiles, par l'augmentation des vitesses de circulation des flux automobiles, qui est passée pour les déplacements locaux de 34 à 37 km/h.

113. Evolution de la distribution spatiale des déplacements

La géographie des déplacements évolue avec la décroissance relative des populations dans les villes-centres, l'augmentation des populations dans les périphéries et l'ouverture croissante des bassins d'emploi. Plus précisément :

- Les déplacements internes à la ville-centre décroissent significativement (-13%) mais le trafic automobile correspondant ne diminue pas ;

- Les échanges entre les banlieues et le centre, et surtout les échanges des périphéries avec le centre augmentent fortement ;

- Contrairement à une idée répandue, la demande globale de transport connaît une croissance modérée au sein des banlieues et des périphéries, mais sa composante automobile augmente davantage : là encore, la croissance est à relier à l'effondrement de la proximité et des échanges internes à une commune.

- Les échanges entre bassins de vie progressent fortement (+69%) en liaison avec la régionalisation de l'emploi et des activités.

- Outre les déplacements « inter-bassins », la croissance de la demande de mobilité est également stimulée par l'essor remarquable des déplacements entre périphérie et banlieue, à relier au redéploiement de l'emploi et des activités au voisinage des rocade d'agglomération.

114. Malgré des investissements importants, les transports publics défendent difficilement leur part de marché

C'est principalement dans les villes-centres que les transports publics progressent. En effet, les déplacements réguliers (domicile-travail à Paris, domicile-études en province) s'y sont mieux maintenus que sur les autres types de liaison, et la vitesse des transports publics y a connu une évolution plus favorable que celle de l'automobile, grâce notamment à l'extension des réseaux ferrés (métro, VAL, tramway) en province. Par

contre, entre la ville-centre et la banlieue, c'est-à-dire là où ils semblaient les mieux armés, leur part régresse bien au delà de ce que pourrait expliquer une évolution défavorable de la structure des motifs. Le desserrement des banlieues explique en partie ce recul. Les structures urbaines des villes européennes ont tendance à devenir moins denses. Les zones les plus denses perdent souvent des habitants et des emplois. Ce sont les zones où les transports collectifs offrent traditionnellement les meilleures prestations et où la répartition modale en transports collectifs affiche les ratios les plus élevés : 20 à 40% dans les villes moyennes et 40 à 70% dans les centres métropolitains ayant les transports collectifs les plus développés, notamment en site propre. Toutefois, l'essentiel de la croissance et des transferts de localisation d'habitat et d'activités se disperse dans des zones à moyennes et faibles densités où le transport collectif est peu maillé et structurellement moins performant et où la répartition modale oscille entre 5 et 15%. Au total, les structures urbaines ont une dynamique d'évolution concentrique de plus en plus inadaptée à la mobilité collective. Les mutations économiques et les transformations des modes de vie tendent à réduire la part des déplacements contraints de type pendulaire (travail, formation) au profit des déplacements moins ou non-contraints (activités du temps libre, achats, loisirs) à configuration polarisées ou atomisées. Hormis les zones denses et les corridors urbains et suburbains structurés autour des infrastructures de transports publics, le transport collectif est globalement confronté à un marché des déplacements de plus en plus difficile à satisfaire car plus diffus dans l'espace et dans le temps (Bovy, 1999). D'autres raisons sont à rechercher, par exemple, dans le vieillissement des banlieues, sachant que les nouvelles générations de retraités gardent leur voiture et utilisent moins les transports publics que leurs aînés (Orfeuil, 1996).

12. La constitution de la donne des déplacements sur l'aire métropolitaine lyonnaise

L'examen de l'évolution des déplacements sur l'aire métropolitaine lyonnaise (couvrant un cercle de 45 km autour du centre de Lyon) doit s'appuyer sur l'observation de données. Il n'existe pas d'enquête de déplacements qui couvre ce périmètre là. Aussi, la mesure des déplacements sur cette aire d'étude se réalisera sur la base d'une donne reconstituée à partir de sources diverses.

121. Des données statistiques des déplacements disponibles ...

Plusieurs sources statistiques susceptibles de fournir des informations sur les volumes et les pratiques de déplacements existent. Cependant, aucune ne permet d'avoir une information exhaustive sur l'aire d'étude retenue.

1211. L'enquête de déplacements de l'agglomération lyonnaise

Réalisée par l'Institut National de la Statistique et des Etudes Economiques (INSEE) pour le compte du Syndicat Mixte des Transports et du Rhône et l'Agglomération Lyonnaise (SYTRAL) et du Ministère de l'équipement, du logement, des transports et de l'espace, l'enquête « déplacements dans l'agglomération lyonnaise » porte sur les comportements de déplacements des personnes dans l'agglomération lyonnaise au sens large. La

méthode utilisée est celle du sondage qui consiste à tirer au sort un échantillon de 6000 logements parmi l'ensemble des logements de l'aire d'étude. Le mode de recueil de l'information est réalisée par des entretiens à domicile auprès des ménages désignés. Toutes les personnes de plus de cinq ans appartenant au ménage sont interrogées sur leurs déplacements de la veille (Cf. annexe 4-2).

Le périmètre de l'enquête ménage déplacements a évolué de 1976 à 1995 afin de prendre mieux en considération l'évolution des pratiques de déplacements dans le cadre du phénomène d'étalement de l'urbanisation de l'agglomération lyonnaise. En 1976, le périmètre de l'enquête recouvrait Lyon et la première couronne de l'agglomération. Dans l'enquête 1985-1986, le périmètre s'élargit. Il s'ajuste alors au périmètre du schéma directeur d'aménagement de l'agglomération lyonnaise. En 1995, à l'aire d'étude correspondant au SDAU, a été ajouté deux secteurs dans le département de l'Ain, regroupant 29 communes. L'ensemble de cette aire d'étude a été découpé en 86 secteurs de tirage d'échantillon (84 secteurs dans le SDAU), plus un secteur dit « externe », regroupant les zones de déplacements ayant une extrémité hors de l'aire d'étude.

Le bassin d'attraction quotidienne de l'agglomération lyonnaise déborde de plus en plus le territoire du SDAU qui est retenu comme périmètre des enquêtes-ménages réalisées tous les dix ans à Lyon. Cependant, au delà de ce périmètre, peu d'informations concernant les pratiques de déplacements des personnes résidentes sont disponibles. Un projet d'enquête ménages déplacements sur le périmètre de la RUL (Région Urbaine de Lyon) avait été envisagé en 1995. Cette enquête devait être réalisée avec une méthodologie différente de celle des enquêtes ménages de l'agglomération lyonnaise. Les entretiens devaient se passer par téléphone. Dans la pratique, seul le pilote de l'enquête a été réalisé auprès de 600 ménages des cantons de la Verpillière (Isère) et de Mornant (Rhône). Les résultats ne sont donc que très peu exploitables.

1212. L'enquête cordon

Les enquêtes cordon permettent d'avoir une estimation des trafics sortant de l'agglomération de Lyon. Deux enquêtes cordon sont disponibles, une effectuée en 1979 et la seconde en 1990. Elles sont réalisées auprès de conducteurs de voitures particulières, de poids lourds et de cars sortant du périmètre de l'agglomération (ou « cordon ») un jour ordinaire de semaine. Ce périmètre correspond approximativement à celui du SDAU. Ces enquêtes permettent de connaître, d'une part le trafic de transit, et d'autre part, le trafic d'échange entre l'agglomération et l'extérieur du cordon. Effectuée tous les dix ans, ce type d'enquête constitue une banque de données sur le « trafic externe » de l'agglomération. L'enquête-cordon donne des renseignements notamment sur la composition du trafic (type de véhicules, motifs, destination), l'évolution des trafics entre deux enquêtes (environ +60% de 1979 à 1990), la nature du trafic en des points particuliers. Si l'enquête cordon permet de connaître la décomposition de la demande selon les motifs, les heures de déplacements, cette enquête du fait même de sa définition ne permet pas ou très mal de reconstituer les schémas spatiaux de déplacements, c'est-à-dire de reconstituer les matrices origine-destination.

1213. Les fichiers des migrations alternantes de l'INSEE

Au delà du périmètre du SDAU, les fichiers Mirabelle des migrations alternantes issus des recensements généraux de la population de l'INSEE constituent une source d'informations non négligeable. Ceux-ci ne décrivent pas des déplacements. Ils recensent les personnes qui déclarent sortir de leur domicile pour travailler, ainsi que les communes d'origine et de destination. Bien que les migrations alternantes ne constituent pas un indicateur de déplacement, on peut admettre qu'elles peuvent renseigner sur les grandes tendances d'évolution des flux de transport. Elles permettent de fournir la structure exhaustive des déplacements pour le motif domicile-travail. En revanche, ce type de source d'informations ne nous renseigne pas sur les pratiques de déplacements mises en oeuvre, notamment sur le mode de déplacement utilisé, la fréquence des déplacements, les horaires, *etc.* En outre, les autres motifs de déplacements restent inconnus.

1214. Les enquêtes SNCF

Nous disposons également d'enquêtes montée-descente réalisées par la SNCF sur la région Rhône-Alpes réalisées en 1994-1995. Ces enquêtes nous renseignent sur les motifs de déplacement, l'origine, la destination, *etc.*

122. ... à la reconstitution de la donne

Le premier constat sur ces différentes sources statistiques existantes est le manque d'homogénéité des données. Sur le périmètre interne de l'aire d'étude, correspondant au périmètre du schéma directeur, les pratiques de déplacements sont bien connues grâce aux trois enquêtes-ménages de déplacements successives (1976, 1986, 1995). Sur le reste du périmètre, aucune source de données réellement satisfaisante n'existe, un travail de reconstitution est nécessaire. Dès lors, nous avons choisi de distinguer ces types de périmètre dans notre travail de modélisation. Le coeur du modèle couvrera ainsi le périmètre le mieux renseigné à savoir celui de l'enquête ménage. En ce qui concerne le reste du périmètre, le travail de modélisation sera moins précis du fait du manque d'information. Une estimation du volume et des composantes de ces déplacements a été menée. Celle-ci s'appuie sur les différentes sources statistiques disponibles et en particulier sur les données des migrations alternantes. En effet, les migrations alternantes fournissent une bonne estimation du volume et de la répartition spatiale des flux effectués pour le motif travail (hypothèse : on assimile de fait le nombre de migrations alternantes au nombre de déplacements effectués pour ce motif). A partir de là, l'enquête SNCF fournit une estimation des parts de marché du fer sur les O-D correspondantes pour le motif considéré (domicile-travail). (hypothèse : nous considérons que la part de marché des autres modes de déplacement est négligeable (car, deux roues)). Enfin, l'enquête cordon permet, à partir des flux domicile-travail effectués en voiture particulière d'extrapoler l'ensemble des flux pour tous motifs dans la mesure où elle fournit une mesure de la décomposition des déplacements par motif. (hypothèse : cette extrapolation est effectuée à partir de la décomposition en motif de déplacement sur l'ensemble de l'enquête cordon. L'hypothèse d'une certaine homogénéité de la répartition des motifs de déplacements selon la liaison géographique considérée est implicitement posée).

Par la suite, une présentation des tendances d'évolution des déplacements dans

l'agglomération lyonnaise est effectuée. Celle-ci s'appuie essentiellement sur l'analyse des données d'enquêtes ménages.

13. L'évolution des déplacements dans l'agglomération lyonnaise : une analyse rétrospective sur 20 ans

La mobilité a de multiples facettes. Le nombre de déplacements par personne n'est plus un indicateur suffisamment pertinent pour représenter l'évolution de la mobilité quotidienne. En effet, alors que le nombre de déplacements (par personne et par jour) augmente peu, que le temps total consacré aux déplacements sur la journée est stable, les déplacements s'allongent fortement et se développent dans les espaces périphériques. Dans ce cadre, la marche à pied, mode de déplacement de proximité, perd du terrain, et les transports publics perdent des parts de marché vis-à-vis de l'automobile, plus à même de répondre à la multidirectionnalité croissante des déplacements.

L'analyse de l'évolution des déplacements dans l'agglomération lyonnaise s'appuie sur un découpage d'analyse. Celui-ci doit réaliser un compromis entre :

- Une prise en compte des différences de caractéristiques selon les diverses zones de l'agglomération : densités de population et d'équipements, périodes d'urbanisation différentes, offres en transports collectifs inégales, pour ne citer que les principales ;

- Une extension du périmètre d'enquête entre 1976 et 1986 ;

- Un nombre acceptable de zones qui permet de fonder l'analyse sur une certaine significativité statistique, compte tenu du nombre d'enquêtes réalisées (le taux de sondage est de l'ordre de 1% de la population de plus de 5 ans, cf. annexe 4-2).

C'est pourquoi le découpage retenu distingue, pour la ville-centre (Lyon et Villeurbanne), d'une part l'hypercentre caractérisé par une offre en métro, une forte densité et des difficultés de stationnement, d'autre part le reste de Lyon-Villeurbanne (y compris Caluire et Cuire) certes dense mais avec une offre en transports collectifs plus diluée et de moindres difficultés de stationnement. Ensuite la distinction est faite parmi les couronnes de la périphérie, entre l'Est et l'Ouest, distinction sociale connue. L'autre critère de découpage de ces couronnes correspond à l'extension du périmètre entre 1976 et 1986. Ainsi sont distinguées sept zones, dont les densités calculées à partir de la population de l'enquête de 1995 illustrent les différences.

Tableau 4-1. Densité de population dans les différentes zones du découpage d'analyse

	7 zones	densité (hab/km ²)
zonage commun aux trois enquêtes de 1976, 1986 et 1995	l'hypercentre (HC) le reste de Lyon-Villeurbanne (RLV)	17 000 6 900
	la 1 ^{ère} couronne Ouest (1CO)	2 900
	la 1 ^{ère} couronne Est (1CE)	2 200
	la 2 ^{ème} couronne Est (2CE)	1 300
zonage commun aux deux enquêtes de 1986 et 1995	la 2 ^{ème} couronne Ouest (2CO)	600
	la 3 ^{ème} couronne Est (3CE)	300

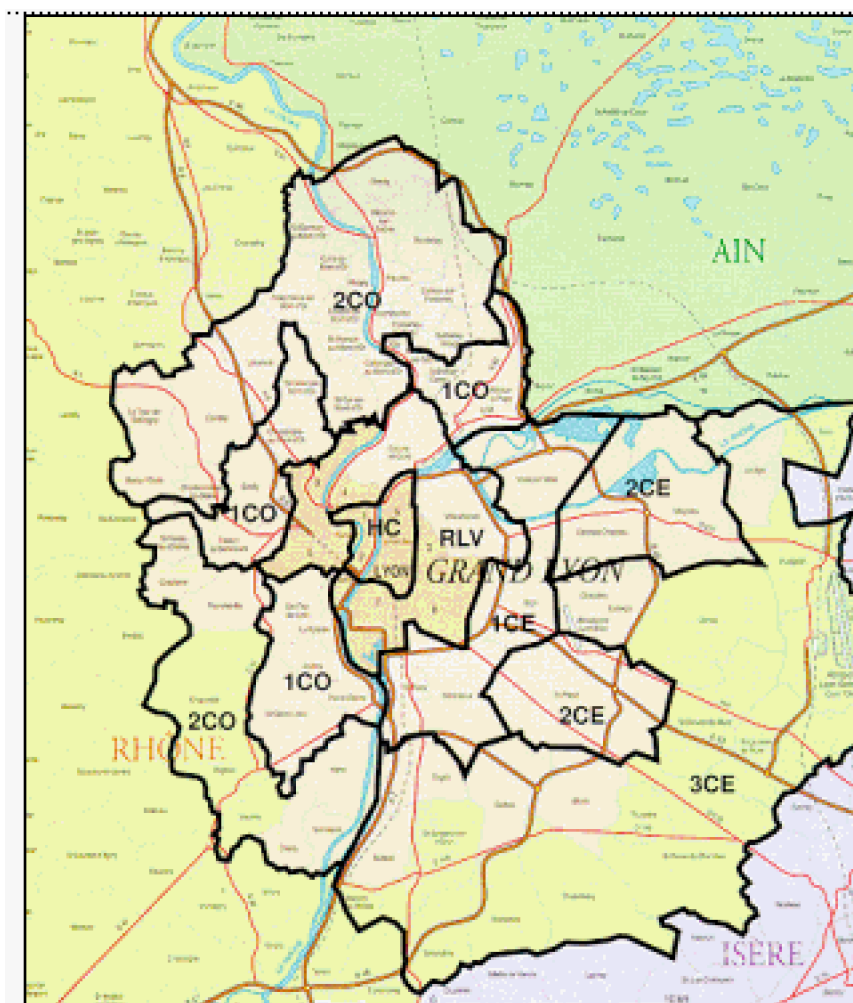


Figure 4-2. Découpage d'analyse

131. L'évolution de la mobilité quotidienne

Le nombre de déplacements recensés un jour de semaine augmente globalement sur la période 1976-1995. Cependant, le nombre de déplacements totaux n'est pas vraiment un indicateur pertinent pour mesurer la mobilité. En effet, la mobilité quotidienne a fortement évolué dans ses dimensions modales, spatiales et temporelles.

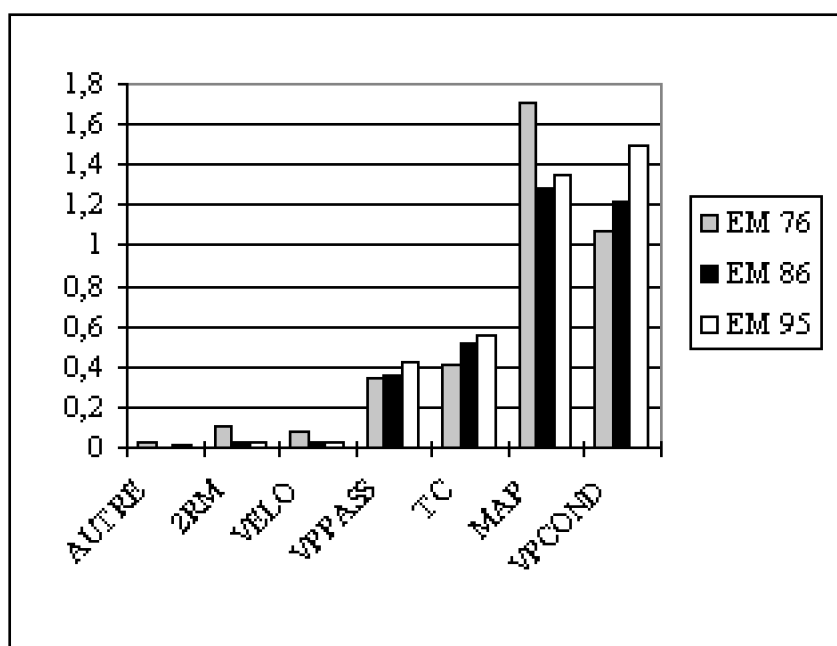
1311. L'évolution de la mobilité par mode : des transformations profondes dans l'usage des modes

Sur le périmètre de l'enquête-ménage 1976, la mobilité quotidienne subit une baisse entre les deux enquêtes 1976 et 1986 (-1% par an), puis se redresse entre 1986 et 1995 pour atteindre un niveau supérieur à celui de 1976 (+1% par an). Afin d'être comprise, cette évolution doit être décomposée en considérant les modes de déplacement. La baisse de la mobilité totale entre 1976 et 1986 peut alors être imputée à celle de la mobilité en marche à pied. On constate en effet une forte chute de la mobilité marche à pied en 1986 selon l'enquête (-3% par an). Cette mobilité se redresse légèrement en 1995 (+1% par an)¹⁷. On constate par ailleurs que la mobilité en deux roues motorisées et celle en vélo baissent de façon très sensible entre 1976 et 1986 (-14% par an pour les deux roues motorisées et -9% par an pour le vélo), ce rythme de décroissance se réduit ensuite (-4% par an pour les deux roues motorisées et -6% pour le vélo).

Tableau 4-2. La mobilité par mode à périmètre constant en 1976

Modes	EM 76	EM 86	EM 95
Autres modes (AUTRE)	0,02	0,00	0,01
Voiture particulière conducteur + transport collectif	0,00	0,00	0,01
Voiture particulière passager + transport collectif	0,00	0,01	0,01
Deux roues motorisées (2RM)	0,11	0,03	0,02
Vélo	0,08	0,03	0,02
Voiture particulière passager (VPPASS)	0,35	0,36	0,43
Transport collectif (TC)	0,41	0,52	0,55
Marche à pied (MAP)	1,71	1,28	1,35
Voiture particulière conducteur (VPCOND)	1,07	1,22	1,50
Mobilité totale	3,75	3,46	3,90

¹⁷ Cette évolution discontinue de la mobilité en marche à pied au cours des trois enquêtes paraît difficilement explicable, sauf par des difficultés de mesure et des différences de protocoles d'enquête. Ces éléments nous incitent donc à considérer avec prudence les résultats sur la mobilité en marche à pied, particulièrement dans l'hypercentre, et par conséquent ceux concernant l'évolution de la mobilité tous modes confondus entre les trois enquêtes.



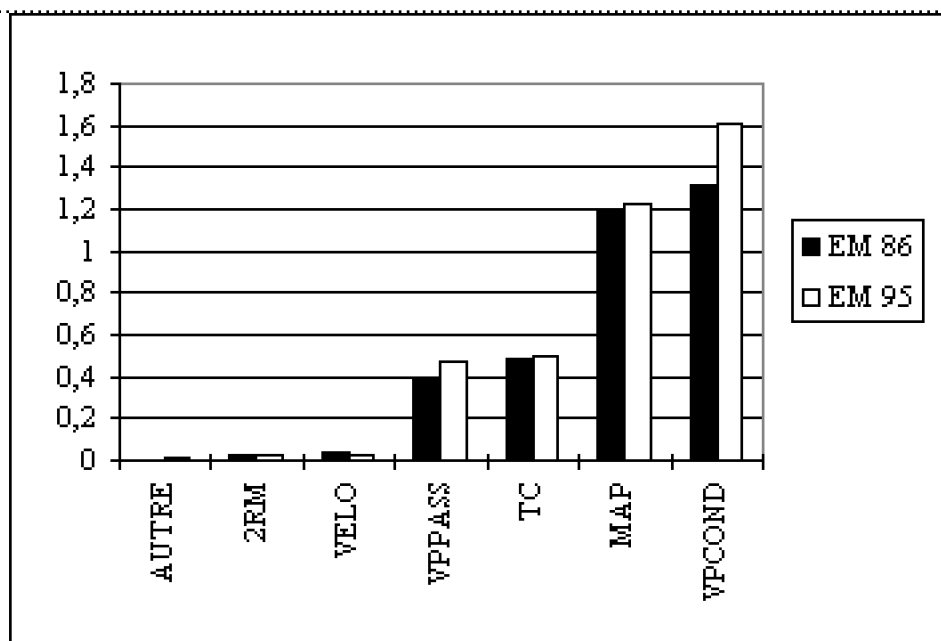
Graphique 4-1. La mobilité par mode à périmètre constant en 1976

Par contre, la mobilité en transports collectifs augmente à un rythme de +3% par an de 1976 à 1986. Elle continue à progresser mais à un rythme moins soutenu (+1% par an). La mobilité en voiture particulière comme conducteur augmente de façon constante sur toute la période (+2% par an de 1976 à 1995). La mobilité en voiture particulière comme passager se maintient à un même niveau entre 1976 et 1986. Elle progresse surtout entre 1986 et 1995 (+2% par an). Au total, sur la période considérée, seules les mobilités en transports collectifs, et en voiture particulière (conducteur et passager) progressent.

Si l'on observe l'évolution de la mobilité sur le périmètre 1986, on constate que la mobilité en marche à pied et en vélo ainsi que la mobilité en transports collectifs sont en stagnation sur la période de 10 ans. En outre, leurs niveaux sont inférieurs à ceux observés sur le périmètre 1976, du fait de la prise en compte à l'intérieur du périmètre 1986 de zones moins denses, plus rurales, et où l'offre en transports collectifs est de moins bonne qualité. La mobilité en voiture particulière passager et conducteur est en progression. L'usage de la marche et des deux-roues régresse fortement, celui des transports publics est globalement stable et l'usage de l'automobile progresse.

Tableau 4-3. La mobilité par mode à périmètre constant en 1986

Modes	EM 86	EM 95
Autres modes (AUTRE)	0,00	0,01
Voiture particulière conducteur + transport collectif	0,01	0,01
Voiture particulière passager + transport collectif	0,01	0,01
Deux roues motorisées (2RM)	0,03	0,02
Vélo	0,04	0,03
Voiture particulière passager (VPPASS)	0,39	0,47
Transport collectif (TC)	0,49	0,50
Marche à pied (MAP)	1,20	1,22
Voiture particulière conducteur (VPCOND)	1,31	1,61
Mobilité totale	3,46	3,90



Graphique 4-2. La mobilité par mode à périmètre constant en 1986

1312. L'évolution de la mobilité par mode et par secteur de résidence

La mobilité tous modes est la plus élevée dans l'hypercentre. Ceci peut s'expliquer par une forte mobilité en marche à pied dans ce secteur autorisée par une densité urbaine élevée. Un différentiel de niveau de mobilité apparaît entre les secteurs Est et Ouest, qui s'explique principalement par une différence de la mobilité en voiture particulière liée à des écarts de niveau de vie.

Tableau 4-4. La mobilité tous modes par secteur de résidence

Secteur	EM 76	EM 86	EM 95
Hypercentre	3,82	3,40	4,29
Reste de Lyon + Villeurbanne	3,76	3,59	3,87
Première couronne Est	3,68	3,46	3,51
Première couronne Ouest	3,55	3,37	4,02
Deuxième couronne Est	4,08	3,16	3,78
Deuxième couronne Ouest		3,53	3,85
Troisième couronne Est		3,67	3,88
Moyenne	3,75	3,48	3,88

La mobilité marche à pied est la plus élevée dans l'hypercentre, zone de densité fortement élevée, facilitant ce type de mobilité. Elle diminue avec l'éloignement au centre où plus exactement pour les secteurs de plus faible densité où les modes de proximité, comme la marche à pied, sont fortement concurrencés par la voiture particulière. Dans cette zone, après avoir connue une forte baisse entre 1976 et 1986, la mobilité marche à pied retrouve son niveau de 1976 en 1995. La mobilité marche à pied est en constante diminution dans le reste de Lyon-Villeurbanne et dans la première couronne Est. Néanmoins, ce rythme de décroissance est moins soutenu pour la dernière période. Dans les autres couronnes, après une baisse entre 1976 et 1986, la mobilité marche à pied se stabilise.

Tableau 4-5. La mobilité en marche à pied par secteur de résidence

Secteur	EM 76	EM 86	EM 95
Hypercentre	2,23	1,67	2,24
Reste de Lyon + Villeurbanne	1,69	1,35	1,27
Première couronne Est	1,50	1,23	1,12
Première couronne Ouest	1,30	0,98	1,02
Deuxième couronne Est	1,70	0,89	0,96
Deuxième couronne Ouest		0,77	0,64
Troisième couronne Est		0,60	0,57
Moyenne	1,71	1,20	1,22

La mobilité en voiture conducteur est relativement faible dans l'hypercentre, et

augmente progressivement à mesure que l'on s'éloigne du centre : elle apparaît nettement liée au niveau de motorisation et inversement liée au niveau de densité de la zone. Dans tous les secteurs, y compris dans l'hypercentre et dans le reste de Lyon-Villeurbanne, la mobilité en voiture conducteur est en progression. Le rythme de croissance semble s'accélérer entre 1986 et 1995, particulièrement dans la première couronne Ouest et la deuxième couronne Est (+3% par an).

Tableau 4-6. La mobilité en voiture particulière conducteur par secteur de résidence

Secteur	EM 76	EM 86	EM 95
Hypercentre	0,77	0,83	1,00
Reste de Lyon + Villeurbanne	1,05	1,24	1,48
Première couronne Est	1,19	1,23	1,43
Première couronne Ouest	1,26	1,50	1,98
Deuxième couronne Est	1,29	1,39	1,85
Deuxième couronne Ouest		1,74	2,12
Troisième couronne Est		2,00	2,19
Moyenne	1,07	1,31	1,60

La mobilité en transports collectifs est particulièrement forte dans l'hypercentre et s'y accroît de +3% par an entre 1976 et 1995, et de +2% par an entre 1986 et 1995. Dans le reste de Lyon-Villeurbanne, le rythme de croissance est un peu moins élevé (+2% par an entre 1976 et 1986 et +1% par an entre 1986 et 1995). Dans les autres zones de périphérie, la mobilité en transports collectifs, après avoir sensiblement augmenté entre 1976 et 1986, a tendance à diminuer ensuite.

Tableau 4-7. La mobilité en transports collectifs par secteur de résidence

Secteur	EM 76	EM 86	EM 95
Hypercentre	0,47	0,61	0,71
Reste de Lyon + Villeurbanne	0,45	0,55	0,62
Première couronne Est	0,39	0,56	0,52
Première couronne Ouest	0,31	0,41	0,37
Deuxième couronne Est	0,20	0,35	0,33
Deuxième couronne Ouest		0,34	0,31
Troisième couronne Est		0,25	0,23
Moyenne	0,41	0,49	0,50

La marche à pied reste majoritaire par rapport aux autres modes dans l'hypercentre, même si les mobilités motorisées y sont en croissance continue. Par contre, dans le reste de Lyon-Villeurbanne la mobilité en marche à pied a décliné de façon continue et est désormais dépassée par celle en voiture particulière conducteur. C'est également le cas en première couronne Est mais là, la voiture particulière conducteur a dépassé la marche à pied dès 1986. Enfin, plus on s'éloigne vers les couronnes périphériques, plus la voiture particulière conducteur devient largement majoritaire, la mobilité en transports collectifs, bien qu'inférieure à 0,5, stagne, tandis que c'est la mobilité en marche à pied qui baisse avec l'éloignement du centre. Toutefois, si l'on observe les mobilités en zones périphériques, la marche à pied aurait certes baissé entre 1976 et 1986 mais resterait à peu près stable ensuite.

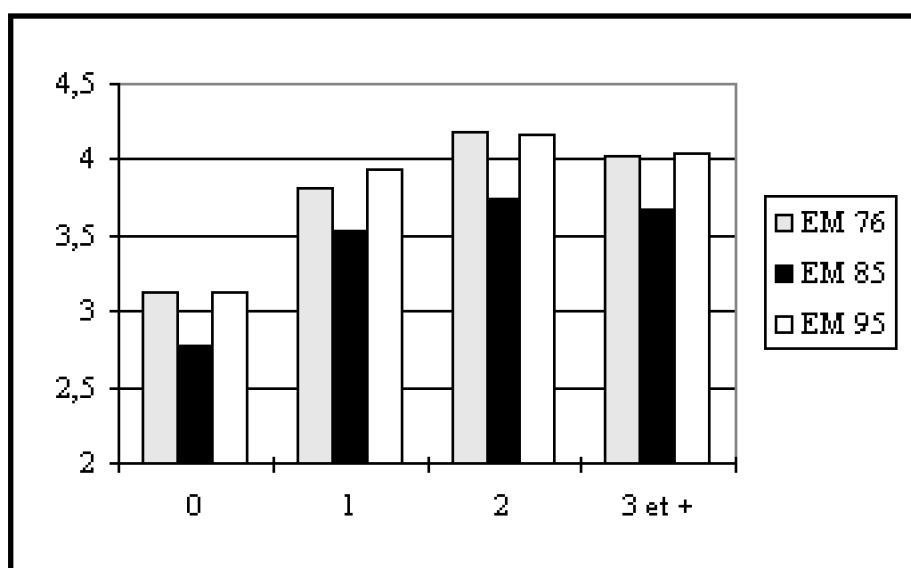
1313. Motorisation et mobilité individuelle par mode

Les niveaux de motorisation et leurs variations semblent avoir une influence déterminante sur la structure de la mobilité. La croissance conjointe des taux de motorisation des ménages et de la mobilité quotidienne se vérifie aussi bien en série chronologique qu'en série croisée.

A mesure qu'augmente le nombre de voiture dans le ménage, le nombre total de déplacement par personne par l'ensemble des modes augmente. Ainsi, selon l'enquête ménage de 1995, par rapport aux ménages sans voiture, les individus appartenant à des ménages ayant une voiture particulière effectuent 26% de déplacements supplémentaires, et ce pourcentage atteint 33% pour les ménages bi-motorisés, ensuite le passage à plus de trois voitures n'accroît pas sensiblement la mobilité. Cette structure motorisation/mobilité se répète au cours des trois enquêtes. La mobilité individuelle globale est une fonction croissante de la motorisation.

Tableau 4-8. Motorisation et évolution de la mobilité totale

nombre de voitures dans le ménage	EM 76	EM 85	EM 95
0	3,13	2,77	3,12
1	3,81	3,54	3,94
2	4,18	3,75	4,16
3 et plus	4,03	3,67	4,04
Moyenne	3,75	3,48	3,90

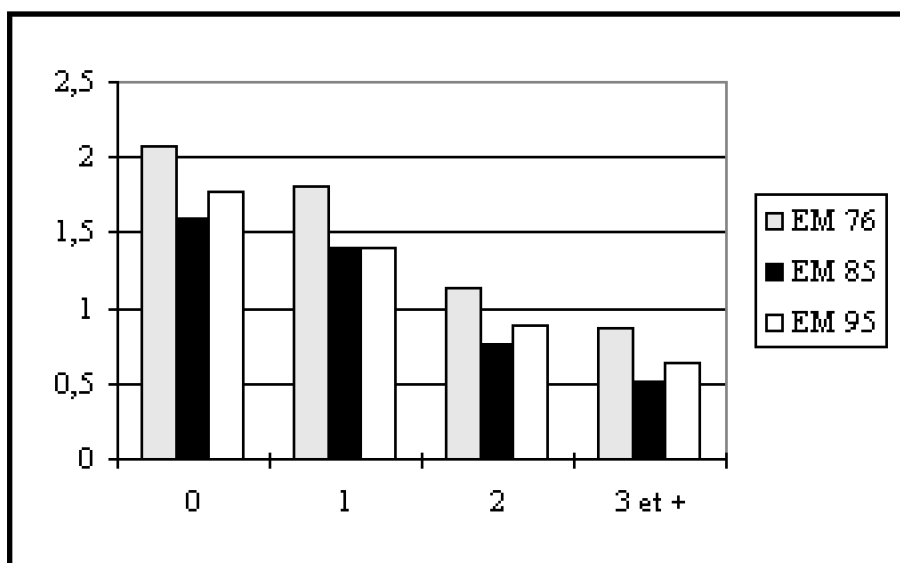


Graphique 4-3. Motorisation et évolution de la mobilité totale

Cette augmentation de la mobilité, fonction du taux de motorisation, se porte plus spécialement sur la voiture particulière aux dépens de la marche à pied et des transports collectifs, à mesure qu'augmente le nombre de voiture particulière dans le ménage.

Tableau 4-9. Motorisation et évolution de la mobilité marche à pied

nombre de voitures dans le ménage	EM 76	EM 85	EM 95
0	2,08	1,60	1,77
1	1,80	1,40	1,40
2	1,14	0,77	0,88
3 et plus	0,87	0,52	0,63
Moyenne	1,71	1,20	1,22

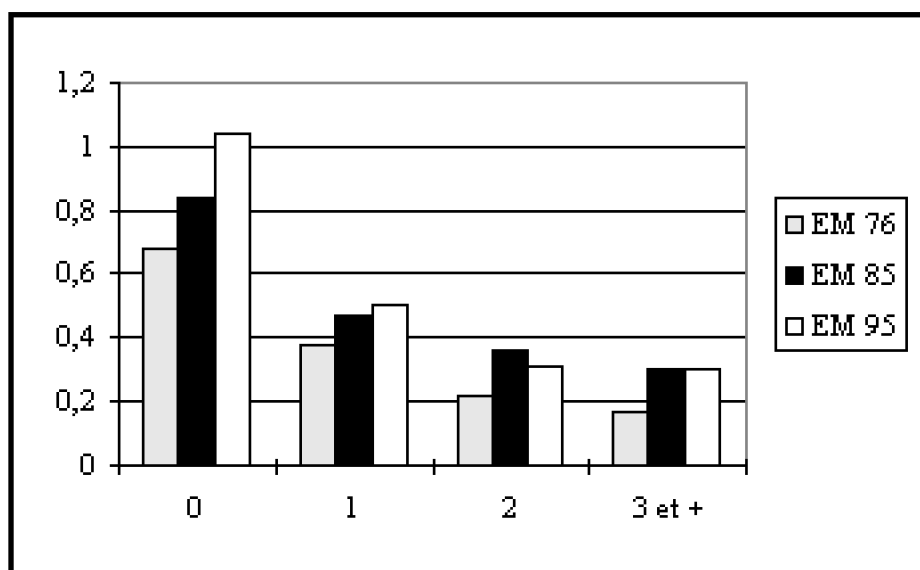


Graphique 4-4. Motorisation et évolution de la mobilité marche à pied

On perçoit une hausse sensible et continue de la fréquentation des transports collectifs pour les personnes non-motorisés. Pour les autres catégories de motorisation, la mobilité en transports collectifs progresse légèrement et essentiellement entre 1976 et 1986, puis tend à se stabiliser.

Tableau 4-10. Motorisation et évolution de la mobilité en transports collectifs

nombre de voitures dans le ménage	EM 76	EM 85	EM 95
0	0,68	0,84	1,04
1	0,38	0,47	0,50
2	0,22	0,36	0,31
3 et plus	0,17	0,30	0,30
Moyenne	0,41	0,49	0,50

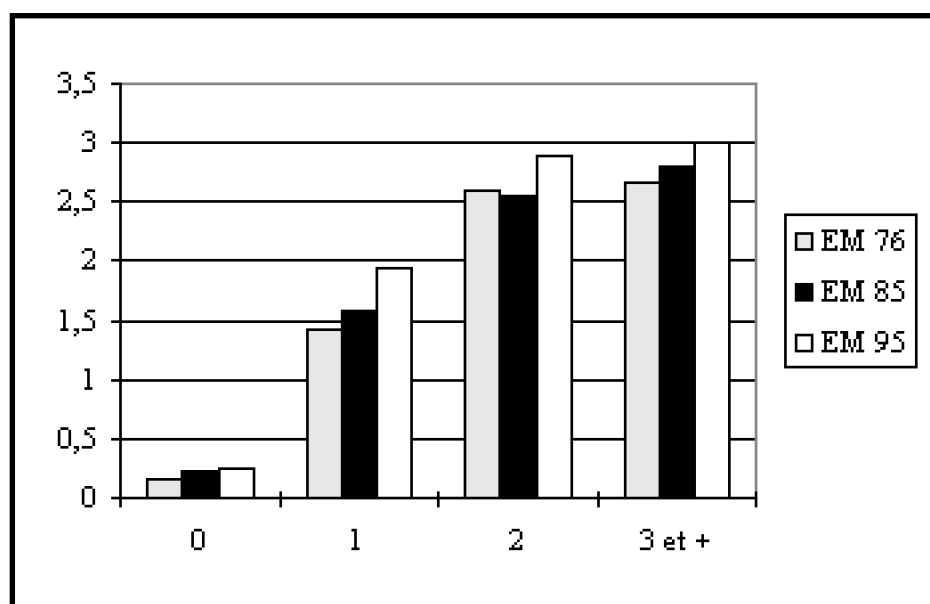


Graphique 4-5. Motorisation et évolution de la mobilité en transports collectifs

La mobilité en voiture particulière connaît une progression régulière pour chacune des catégories de motorisation, sauf pour les personnes appartenant à un ménage bi-motorisé (légère baisse puis hausse).

Tableau 4-11. Motorisation et évolution de la mobilité en voiture particulière

nombre de voitures dans le ménage	EM 76	EM 85	EM 95
0	0,16	0,22	0,25
1	1,42	1,58	1,94
2	2,60	2,55	2,88
3 et plus	2,66	2,80	3,01
Moyenne	1,42	1,70	2,08



Graphique 4-6. Motorisation et évolution de la mobilité en voiture particulière

132. L'évolution des flux de déplacements

1321. La modification géographique des flux

La géographie des déplacements évolue avec la décroissance relative des populations dans les villes-centres, l'augmentation des populations dans les périphéries et l'ouverture croissante des bassins d'emploi. La géographie des déplacements évolue principalement sur les échanges radiaux et les flux tangentiels.

Tableau 4-12. Evolution de la répartition géographique des volumes des déplacements

	Flux de déplacements			taux croissance moyen annuel		
	EM 76	EM 85	EM 95	76-85	85-95	76-95
Centre - Centre	1 918 322	1 621 974	1 954 451	-2 %	2 %	0 %
Centre - Banlieue	1 882 633	419 812	505 215	1 %	2 %	3 %
Centre - Périphérie		195 695	257 176		3 %	
Banlieue - Banlieue	705 455	591 873	695 478	-2 %	2 %	0 %
Banlieue - Périphérie		159 796	235 056		4 %	
Périphérie - Périphérie		455 553	599 635		3 %	
Total	3 006 410	3 444 703	4 247 011	2 %	2 %	4 %

Les tendances suivantes sont observées :

Les flux radiaux entre la ville-centre et la banlieue, et surtout entre la ville-centre et la périphérie sont en forte progression.

Les déplacements internes à la ville-centre sont en relative stagnation ;

Les flux de banlieue à banlieue restent constants ;

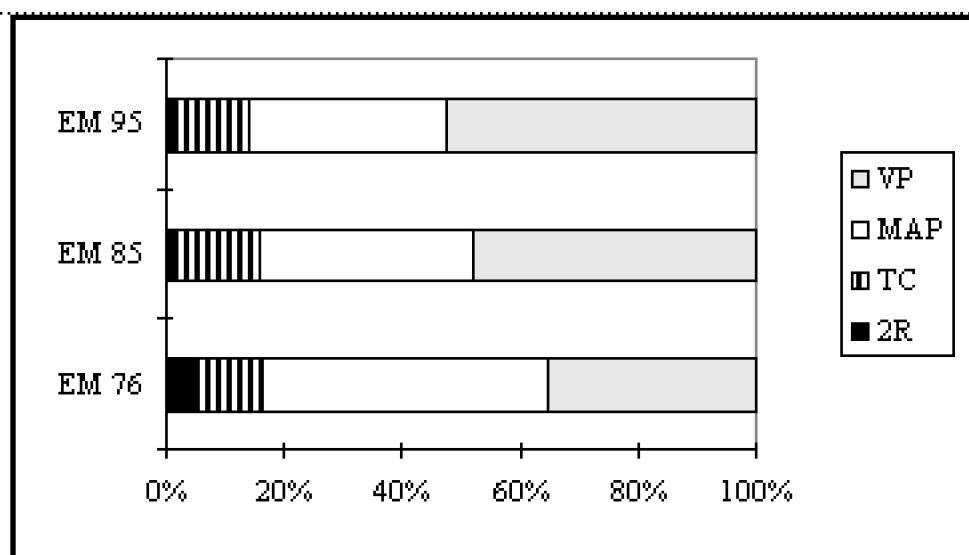
Enfin, les plus fortes progressions de flux se portent sur les liaisons entre la banlieue et la périphérie et de périphérie à périphérie.

1322. Une évolution des parts modales favorable à la voiture particulière

Le fait le plus marquant de l'évolution des déplacements sur 20 ans de l'agglomération lyonnaise est la croissance prononcée des déplacements réalisés en voiture particulière. En effet, la part de celle-ci passe de 34% en 1976 à 53% en 1995, soit une progression de 4% par an. Sur cette période, les transports publics assurent une part croissante des déplacements avec une progression de 2% par an. Cependant, cette augmentation, réalisée principalement au cours de la période 1976-1986 est à mettre en regard des investissements lourds d'infrastructures de transport. Enfin, cette progression des transports collectifs se fait essentiellement au détriment des modes les plus lents, la marche à pied et les deux roues. La part de la marche à pied chute nettement entre 1976 et 1986 (-13 points de part de marché), et, de façon moindre, entre 1986 et 1995 (- 3 points de part de marché) tout comme celle des deux roues.

Tableau 4-13. Evolution des parts modales en pourcentage

Mode	EM 76	EM 86	EM 95
Deux Roues	5	2	1
Transports Collectifs	11	14	13
Marche à pied	48	36	33
Voiture particulière	35	48	52
Rapport TC/(VP+TC)	23	23	20



Graphique 4-7. Evolution des parts modales en %

Tableau 4-14. Evolution des parts de marché de la voiture particulière par liaison en %

	EM 76	EM 86	EM 95
Centre - Centre	28	35	36
Centre - Banlieue	62	68	71
Centre - Périphérie		76	78
Banlieue - Banlieue	34	42	51
Banlieue - Périphérie		85	87
Périphérie - Périphérie		57	64
Total	34	48	52

Tableau 4-15. Evolution des parts de marché des transports collectifs par liaison en %

	EM 76	EM 86	EM 95
Centre - Centre	12	16	17
Centre - Banlieue	24	27	22
Centre - Périphérie		21	16
Banlieue - Banlieue	4	6	5
Banlieue - Périphérie		18	9
Périphérie - Périphérie		4	4
Total	11	15	13

Tableau 4-16. Evolution des parts de marché de la marche à pied par liaison en %

	EM 76	EM 86	EM 95
Centre - Centre	56	47	46
Centre - Banlieue	5	3	5
Centre - Périphérie		0	1
Banlieue - Banlieue	55	49	42
Banlieue - Périphérie		1	2
Périphérie - Périphérie		35	29
Total	49	35	33

De l'observation des parts de marché par type de liaison, il est possible d'identifier quelques tendances :

- La marche à pied perd des parts de marché sur toutes les liaisons entre 1976 et 1986, et en particulier à l'intérieur de la ville-centre ;

- A *contrario*, les transports collectifs gagnent des parts de marché sur toutes les liaisons entre 1976 et 1986, mais plus fortement dans la ville-centre ;

- Enfin, sur toutes les liaisons, la proportion des déplacements en véhicule particulier s'accroît.

1323. La dérive des motifs

Les motifs retenus pour l'analyse sont ceux retenus pour la modélisation (excepté le motif de l'accompagnement). Nous distinguons ainsi le motif pour achats, le motif services, le motif pour les activités récréatives, trois motifs pour l'enseignement, (distingué par la suite en enseignement primaire, enseignement secondaire et enseignement supérieur), le motif pour le travail et enfin un ensemble « autres motifs ».

Tableau 4-17. L'évolution de la répartition des motifs en destination en pourcentage

en %	EM 95	EM 86	EM 76
Services	2	5	6
enseignement	18	14	14
Accompagnement	12	11	13
Autres	13	12	13
Loisirs	9	12	13
Achats	21	18	16
Travail	26	28	25
	100	100	100

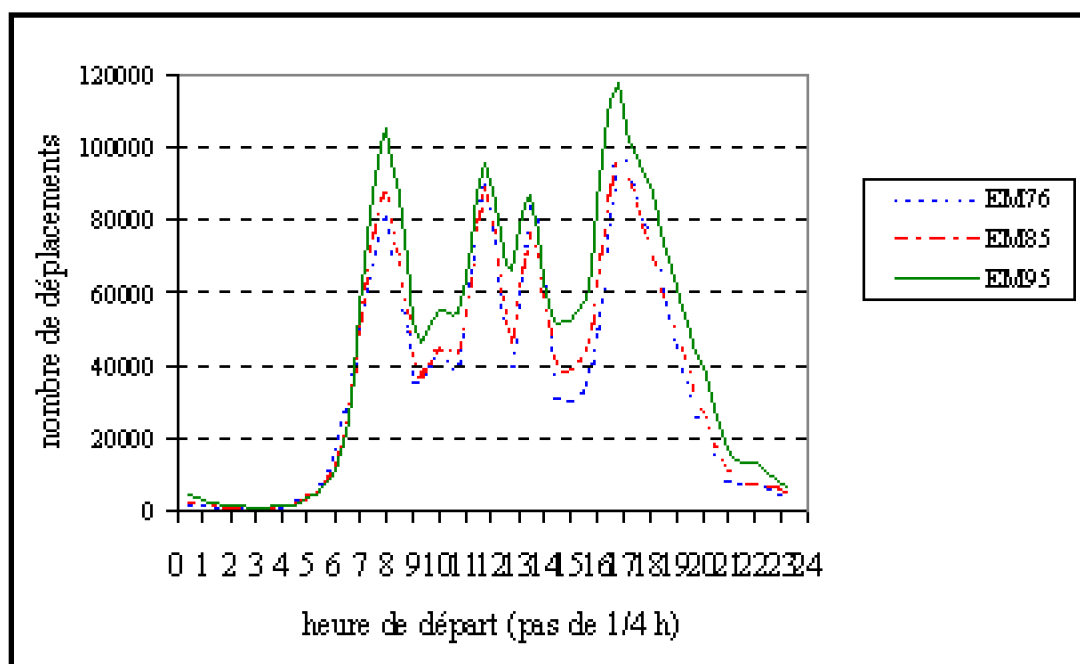
Les déplacements contraints (travail, études) sont en baisse relative sur la période de 20 ans (1975-1995). La part du travail diminue pour représenter un quart des motifs de

déplacements en destination, l'enseignement et l'accompagnement restent à peu près au même niveau avec moins de 15% des motifs de déplacements chacun. Les déplacements pour motif personnel (services, loisir) ont une part en hausse sensible.

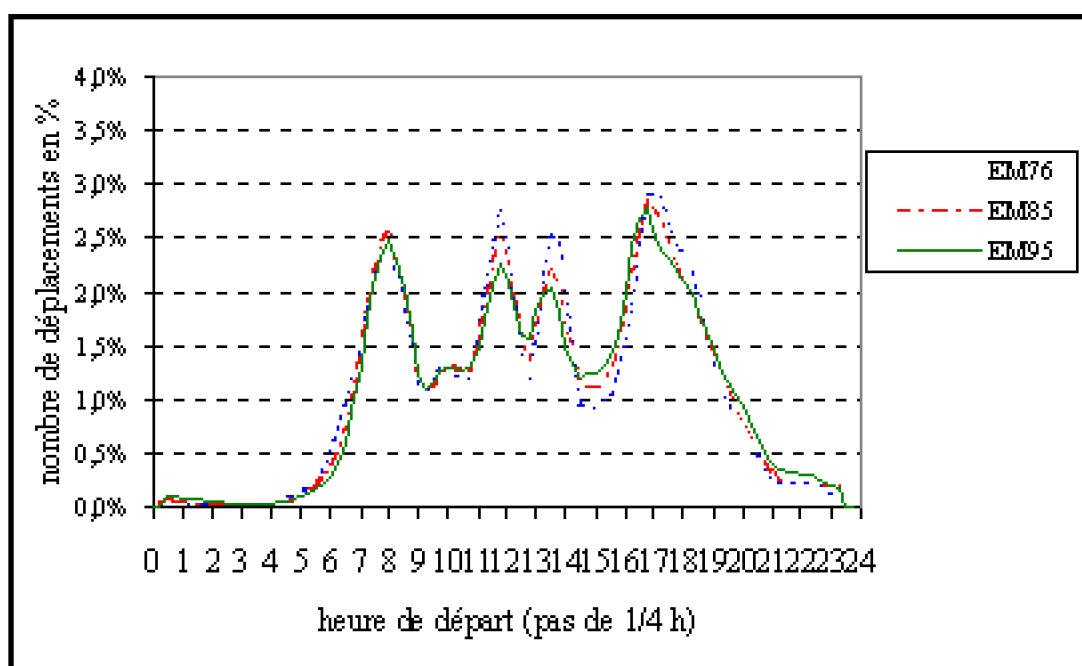
133. L'évolution des rythmes temporels des déplacements

On mesure la temporalité des déplacements en évaluant le nombre de déplacements au cours d'une tranche de temps donnée. La période de temps étudiée s'étend de 0 à 24 heures, par tranche d'un quart d'heure. Les courbes ont été lissées en calculant une moyenne mobile sur une heure (moyenne mobile d'ordre 4).

Le profil des rythmes temporels des déplacements conserve globalement la même allure au cours de la période 1976-1995 (graphiques 4-8 et 4-9). Les trois périodes de pointe demeurent. La période de pointe du matin s'accroît. On constate une montée en charge globale, tandis qu'en structure relative, la part des deux pointes du midi décroît régulièrement et que le creux relatif de l'après-midi, quoique toujours largement présent, est de moins en moins marqué. Les périodes en creux des milieux de demi-journée sont plus utilisées, en particulier celle de l'après-midi à partir de 14h.

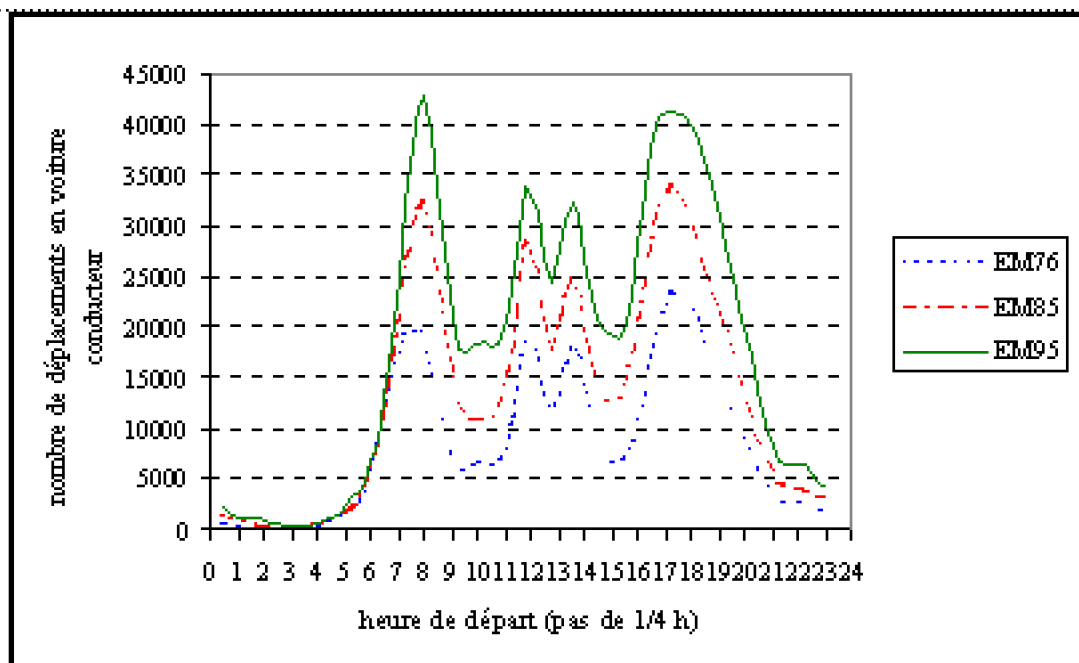


Graphique 4-8. Evolution des profils horaires des déplacements tous modes (moyenne mobile d'ordre 4)

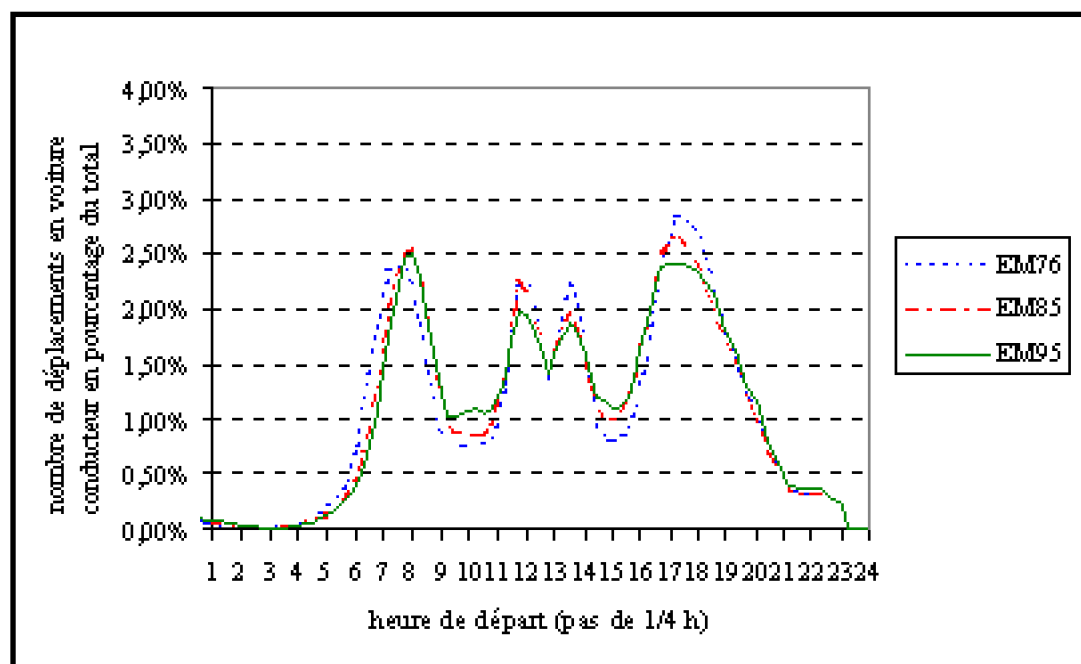


Graphique 4-9. Evolution des profils horaires des déplacements en pourcentage

Etant donné que les déplacements en véhicule particulier sont majoritaires, on retrouve les résultats d'ensemble (graphique 4-10). La montée en puissance en valeur brute est générale à l'ensemble de la journée entre 1986 et 1995 et est plus marquée pour les creux traditionnels du matin et de l'après-midi. En part relative (graphique 4-11), la pointe du matin est décalée plus tard dans la matinée en vingt ans, les pointes et creux du milieu de journée sont légèrement atténués tandis que la pointe de l'après-midi a tendance à s'étaler en prenant plus de volume.

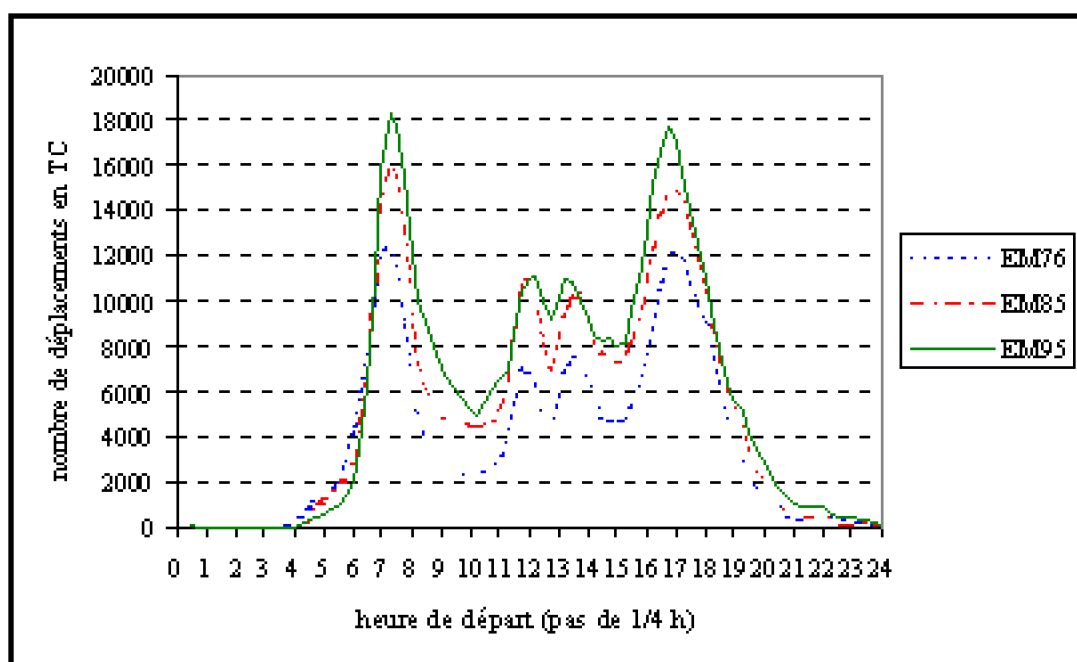


Graphique 4-10. Evolution des profils horaires des déplacements en voiture conducteur

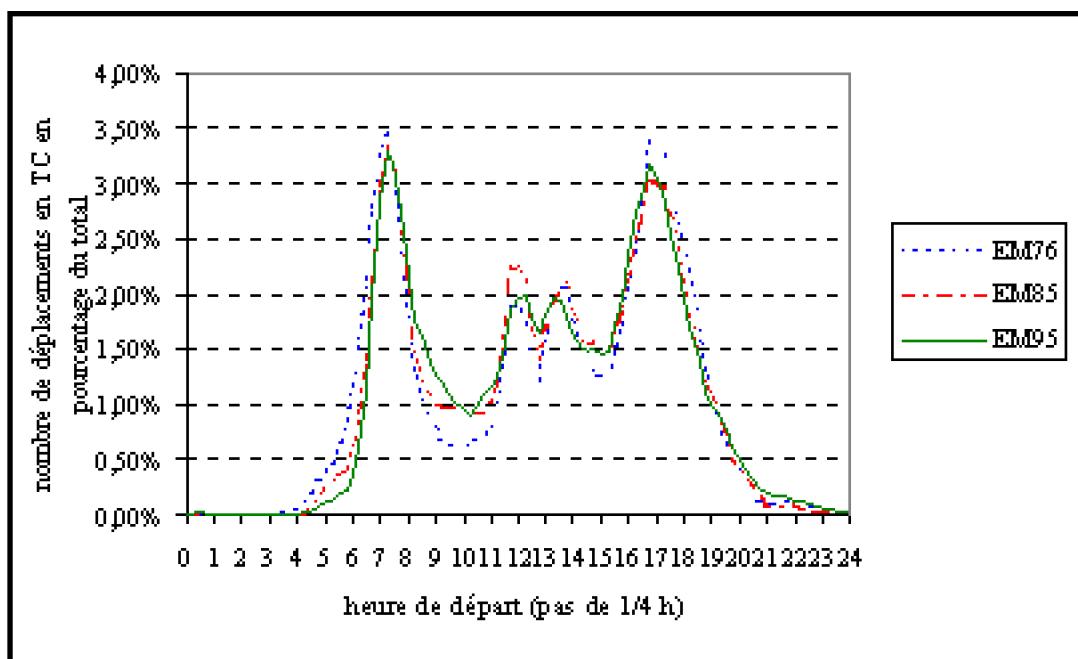


Graphique 4-11. Evolution des profils horaires des déplacements en voiture conducteur en pourcentage

Le profil horaire du trafic en transports collectifs ne s'est pas sensiblement modifié en 20 ans (graphique 4-12). Les pointes du matin et du soir restent très marquées et très concentrées, surtout sur le matin. Cette pointe s'est légèrement décalée entre 1976 et 1986. Les pointes du midi se tassent en relatif (graphique 4-13), mais se maintiennent en valeur absolue entre 1986 et 1995. Les creux du matin et de l'après-midi se sont légèrement comblés en part relative entre 1976 et 1986.

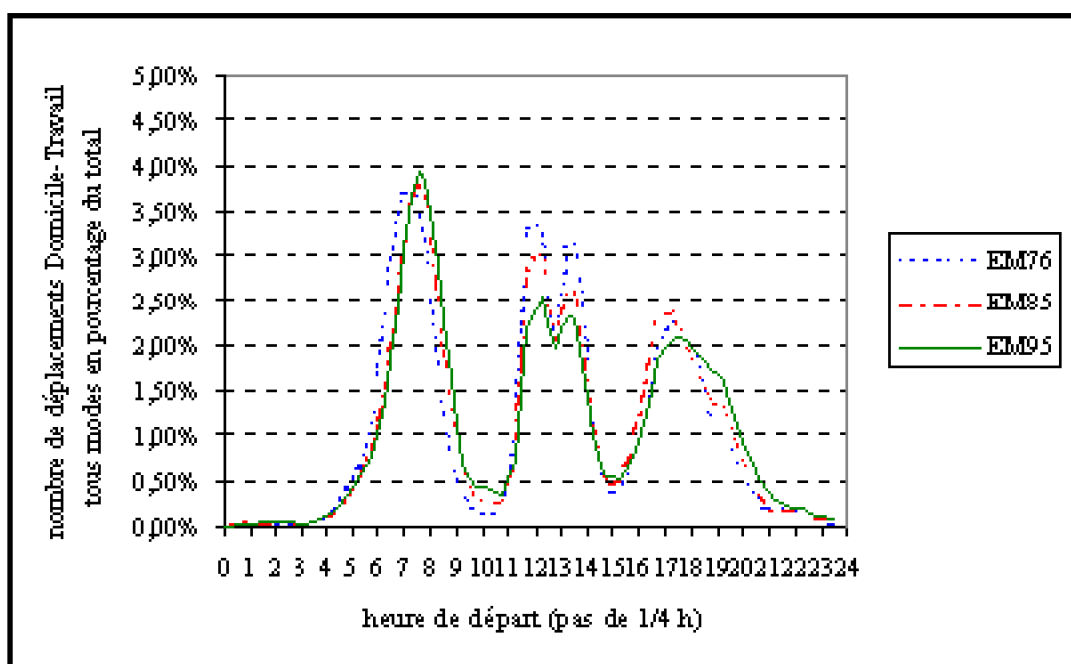


Graphique 4-12. Evolution des profils horaires des déplacements en transports collectifs

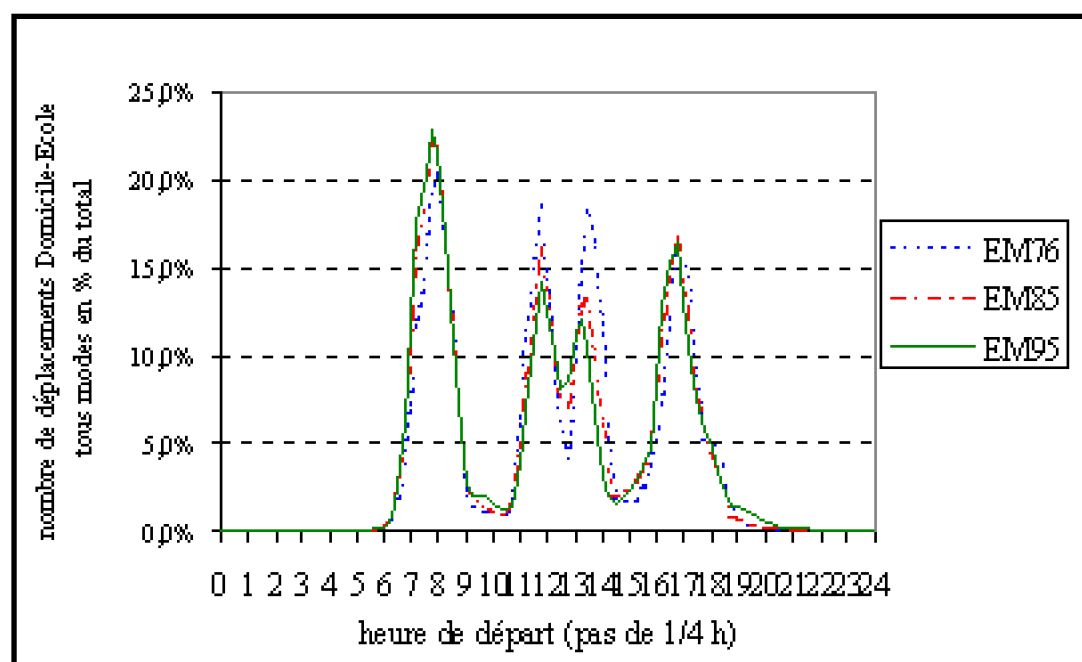


Graphique 4-13. Evolution des profils horaires des déplacements en transports collectifs en pourcentage

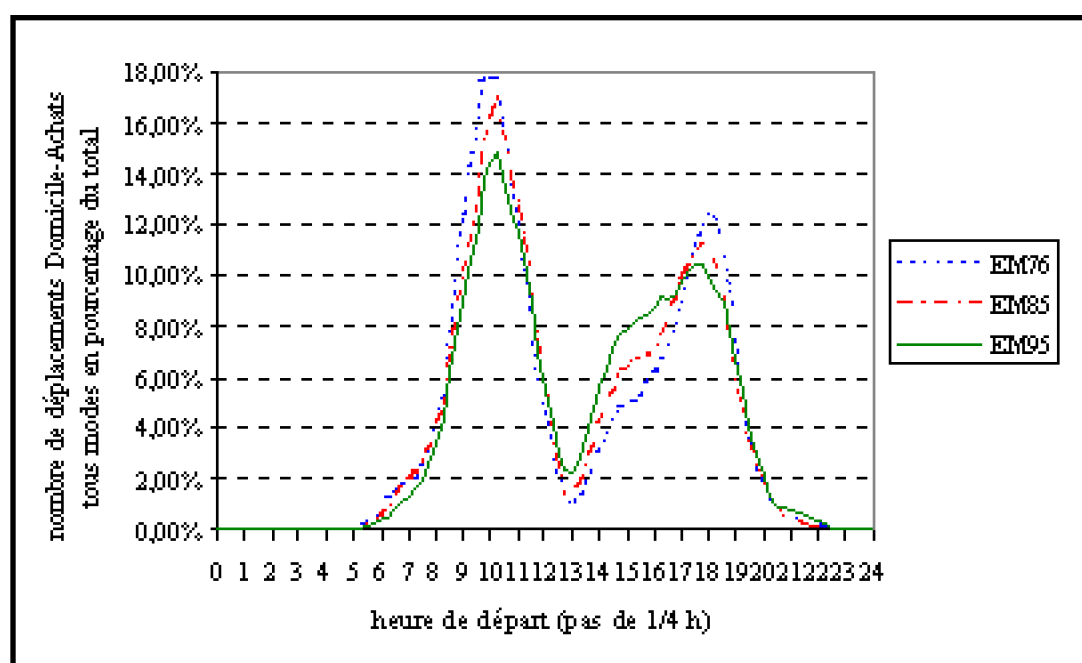
L'analyse en termes de motifs de déplacements conduit aux constatations suivantes (graphiques 4-14, 4-15 et 4-16). Les déplacements liés au trajet Domicile-Travail contribuent à l'étalement de la pointe du soir. Les déplacements liés au Domicile-Ecole expliquent l'accroissement de la pointe du matin. Enfin, les déplacements liés au Domicile-Achat contribuent au gonflement des heures creuses.



Graphique 4-14. Evolution des profils horaires de déplacements pour le motif Domicile-Travail



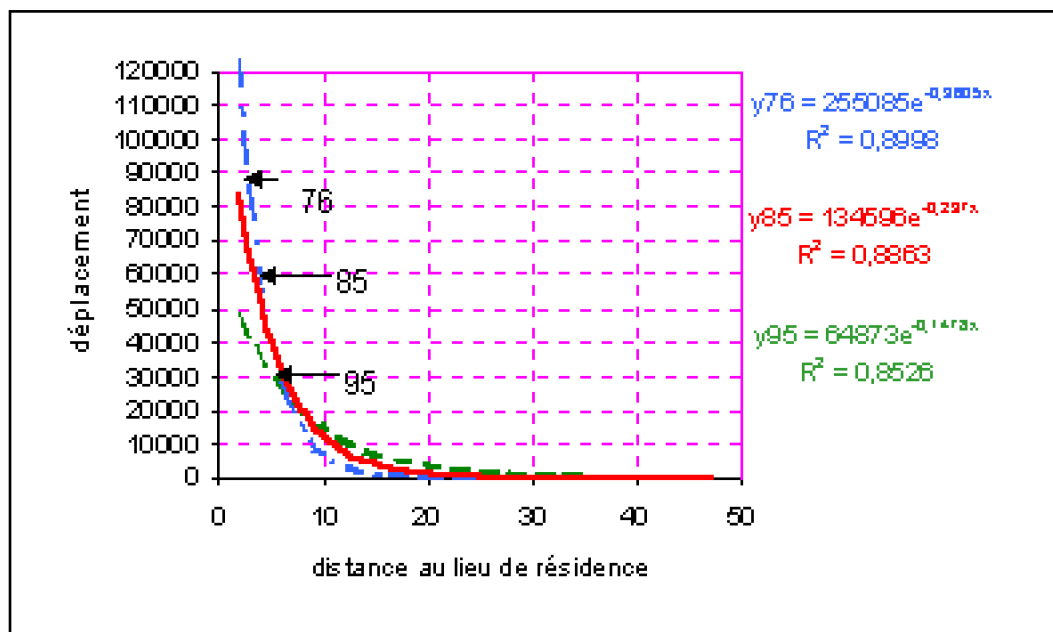
Graphique 4-15. Evolution des profils horaires de déplacements pour le motif Domicile-Ecole



Graphique 4-16. Evolution des profils horaires de déplacements pour le motif Domicile-Achat

134. L'évolution des distances parcourues

D'après les enquêtes de l'INSEE sur les migrations alternantes, la portée moyenne d'un trajet pour se rendre à son lieu de travail concernant un périmètre de 45 kilomètres de rayon autour de Lyon passe de 8,4 km en 1975 à 11,1 km en 1990, soit une croissance de 32%¹⁸. De même, les données des enquêtes ménages montrent une forte tendance à la dispersion des déplacements pour le travail en fonction de la distance au domicile. La relation entre distance résidence - travail et la fréquence de déplacement peut être bien appréhendée par une fonction exponentielle négative. En 20 ans, la forte croissance du coefficient de l'exponentiel traduit une tendance à une plus grande dispersion des flux.



Graphique 4-17. Evolution de la dispersion des déplacements pour le travail en fonction de la distance au domicile

135. L'évolution des budgets temps de déplacements

Les temps de déplacements à notre disposition proviennent de l'enquête ménage. Il s'agit de temps de déplacements déclarés (donc porte à porte) par les personnes enquêtées. A partir de ces temps, nous pouvons calculer des temps moyens sur la base des flux de déplacements de zone à zone.

A l'échelle de l'agglomération, le temps moyen global de déplacements en voiture particulière se situe autour du quart d'heure : 16 minutes en 1976, 15 en 1986 et 16 en 1995. Une remarquable stabilité caractérise donc les temps moyens sur vingt ans, malgré une légère baisse en 1986 qui ne semble pas très significative. Cela confirme donc la stabilité des budgets temps soulignée précédemment.

La moyenne des temps de parcours en transports collectifs se situe autour de la

¹⁸ Ces distances parcourues ont été mesurées d'une part avec l'aide des fichiers des migrations alternantes de l'INSEE qui fournit une matrice du nombre de navetteurs entre une zone résidentielle et une zone du lieu de travail identifiée, et d'autre part avec une matrice des distances-réseaux entre zones reconstituées avec l'aide du logiciel Autoroute Express.

demi-heure. Globalement, on observe une baisse de la moyenne des temps de parcours en transports collectifs liée à la mise en service du métro à Lyon en 1978 (en 76, la moyenne s'élevait à 37 minutes, en 1986 à 31 minutes) puis une stabilisation dans la dernière période (en 1995, 31 minutes également). Cette stabilisation masque cependant des baisses de temps de parcours en dernière période en ce qui concerne les liaisons entre la première couronne Est et l'hypercentre ainsi qu'entre l'Est et l'Ouest (flux transversaux). Ces baisses peuvent être légitimement attribuées à l'ouverture de la ligne D.

Section 2. Evolution et représentation des formes urbaines : observation sur l'agglomération lyonnaise

21. Les tendances générales de l'évolution de l'urbanisation

L'urbanisation de ces dernières années est fortement marquée par l'extension des espaces urbanisés et par une modification profonde des structures urbaines. Les franges périphériques se développent jusque dans les campagnes. Le centre se dépeuple au profit de sa banlieue et surtout des communes rurales périphériques. Le terme de périurbanisation est largement employé pour désigner ce phénomène. Ainsi, après le développement des faubourgs, forme traditionnelle de la croissance spatiale urbaine vers 1870, puis l'extension des banlieues caractérisant le siècle 1870-1970, la périurbanisation est le mode dominant de développement urbain. Dans ce contexte de mutations et de croissance, habitat et activité productive ont des logiques de localisation différentes qui engendrent une ségrégation fonctionnelle de l'espace urbain. La mise en cohérence globale des espaces ainsi créés n'est obtenue qu'au prix de profonds déséquilibres. Elle se traduit, comme nous l'avons vu plus haut, par l'allongement des distances des déplacements liés au motif travail. Cette extension de la ville ne se limite pas à son emprise continue au sol. Elle est aussi et d'abord le résultat d'une attraction de plus en plus forte sur des espaces de plus en plus éloignés de la ville. Les mailles du tissu urbain ne sont plus forcément très réguliers et peuvent même devenir lâches en certains endroits. Cette évolution n'en signifie pas moins une polarisation croissante du territoire. La croissance urbaine se fait également suivant de nouvelles modalités. Elle ne se fait pas simplement par une concrétion aux franges de l'espace - l'espace urbain gagne sur l'espace rural - mais aussi par une restructuration interne de la localisation des ménages et des activités. Ils se déplacent de plus en plus loin du centre même si cette tendance est plus nette pour les individus que pour les entreprises. Les ménages sous l'effet de différents facteurs (prix du foncier au centre, accessibilité au centre facilitée, valorisation des aménités environnementales, etc.) se localisent dans un espace intermédiaire entre le rural et l'urbain. Cette émigration ne se fait pas pour autant sans perte de liens avec le centre notamment avec le maintien d'un emploi dans cette zone.

22. L'évolution des formes d'urbanisation de l'agglomération lyonnaise

L'agglomération lyonnaise n'échappe pas à cette tendance de la croissance urbaine aussi

bien pour les ménages que pour les entreprises. L'aire d'influence de Lyon, mesurée par l'augmentation du nombre de migrations alternantes en direction de la ville-centre, s'étend (cf. figure 4-3).

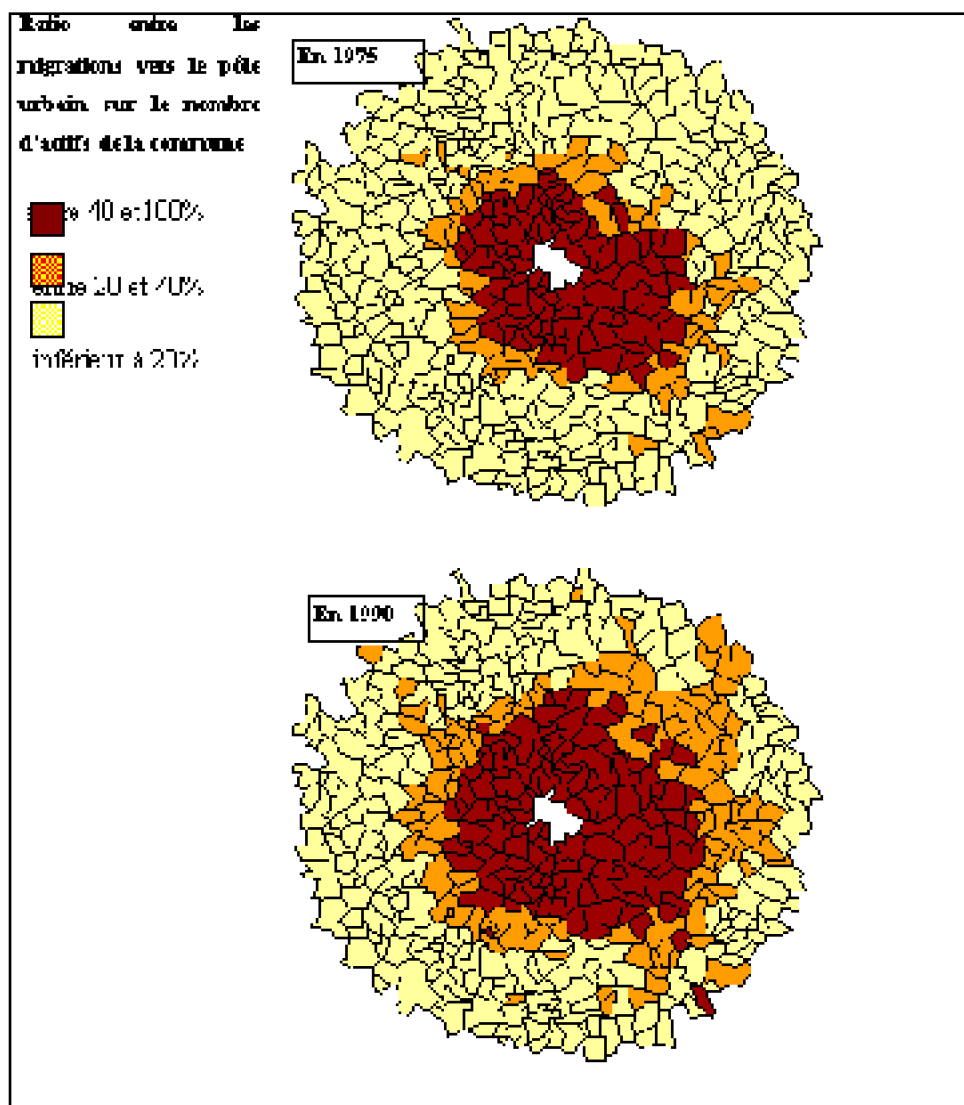


Figure 4-3. Evolution de l'aire d'influence de Lyon (augmentation du nombre de migrations alternantes en direction du pôle urbain entre 1975 et 1990).

Un certain nombre de travaux a été mené par des chercheurs appartenant au laboratoire d'économie des transports sur l'évolution des formes d'urbanisation sur l'agglomération lyonnaise¹⁹.

221. L'évolution de la localisation de la population

Sur un rayon de 45 km autour de Lyon, la population est en constante augmentation suivant les différents recensements généraux de la population depuis 1936. Elle gagne

¹⁹ Tabourin, Andan, Routhier (1995) ; Buisson, Mignot, Bloy (1999).

des espaces toujours plus éloignés du centre. Cet étalement se double d'une recomposition de l'espace urbain. Le centre de la ville connaît une diminution de sa population alors que la périphérie enregistre une croissance sur des espaces de plus en plus éloignés du centre.

Tableau 4-18. Evolution intercensitaire de la population sur la région lyonnaise

	<i>Taux de croissance globaux en %</i>		
	75-82	82-90	75-90
Ville-Centre	-7	1	-6
Première Couronne	0	1	0
Deuxième Couronne	24	21	50
Grand Périurbain	4	17	22
Aire totale	3	14	18

Source : Recensements de la population de 1975, 1982, 1990.

L'évolution des formes urbaines est en partie orientée par l'évolution de l'offre de transport. Afin d'apprécier les déformations de l'espace liées à la présence d'infrastructure de transport de différents types (autoroutes, routes nationales, voies rapides, etc.), la représentation de répartition de la population en fonction de sa distance-temps par rapport au centre de l'agglomération est proposée²⁰.

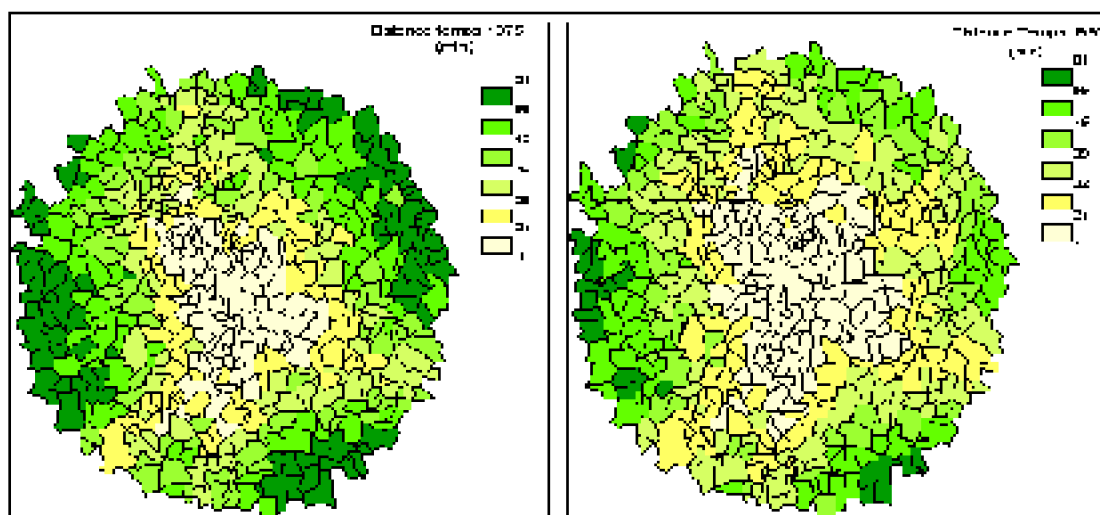


Figure 4-4. Evolution de l'offre de transport : une accessibilité au centre accrue entre 1975 et 1990

²⁰ Ce calcul s'est fait à l'aide du logiciel Autoroute Express. Celui-ci détermine en fonction des hypothèses retenues pour la vitesse sur les différents types d'infrastructures, l'itinéraire le plus rapide ou le plus court pour rejoindre une localité à une autre. La vitesse étant différente selon les axes, l'itinéraire le plus court n'est pas forcément le plus rapide. Or, considérant que les ménages sont plus sensibles au temps qu'à la distance kilométrique, nous avons retenu comme option de calcul l'itinéraire le plus rapide. (Masson, Péguy, 1998).

En quinze ans, l'augmentation de l'offre de transport tant en volume qu'en qualité (réseau autoroutier) a permis d'accroître sensiblement le nombre de communes qu'il est désormais possible d'atteindre à partir du centre en moins d'une heure. La croissance en termes de population a été plus importante pour les espaces ayant connu les gains d'accessibilité les plus forts. Cela semble confirmer le rôle des transports sur la morphologie urbaine.

222. L'évolution des localisations des emplois et des actifs dans l'agglomération lyonnaise

Les mouvements de stocks d'actifs et d'emplois suivent le mouvement général de périurbanisation à savoir une diminution des actifs et des emplois dans la ville-centre, une moindre diminution dans la première couronne, une forte augmentation dans la deuxième couronne et enfin une hausse dans le grand périurbain. Sur la dernière période (82-90), la perte des emplois et des actifs sur la ville-centre s'atténue.

Tableau 4-19. Evolution des actifs par secteur sur la région lyonnaise

	Taux de croissance globaux en %		
	75-82	82-90	75-90
Ville-Centre	-13	0	-13
Première Couronne	-5	-3	-7
Deuxième Couronne	24	17	45
Grand Périurbain	12	13	26

Source : Recensements de la population de 1975, 1982, 1990.

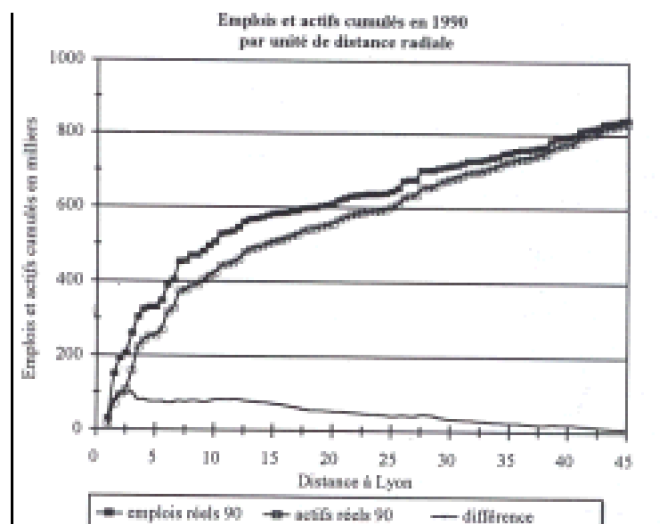
Tableau 4-20. Evolution des emplois par secteur sur la région lyonnaise

	Taux de croissance globaux en %		
	75-82	82-90	75-90
Ville-Centre	-6	-1	-7
Première Couronne	2	9	11
Deuxième Couronne	30	27	65
Grand Périurbain	8	7	16
Aire totale	3	7	10

Source : Recensements de la population de 1975, 1982, 1990.

E. Tabourin (1995) a réalisé une étude sur les localisations des emplois et des actifs résidents occupés sur l'agglomération lyonnaise. Nous reprenons ici ses travaux. L'analyse est réalisée aussi bien en statique, c'est-à-dire en considérant une année

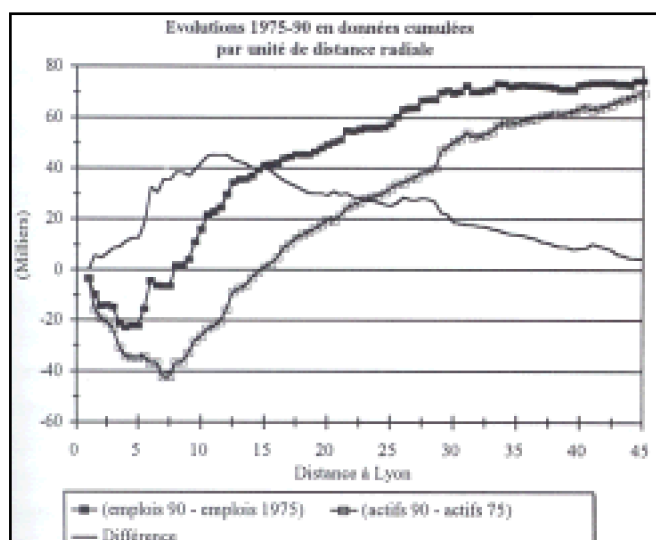
d'observation donnée, qu'en dynamique, en considérant les évolutions de ces localisations dans le temps. L'analyse statique est réalisée sur les localisations repérées à partir du recensement de 1990, et l'analyse dynamique sur les évolutions de localisations observées entre 1975 et 1990. L'analyse statique des localisations s'appuie sur l'observation de la répartition en données cumulées, par unité de distance au centre, des emplois et des actifs résidents occupés (cf. graphique 4-18). Il ressort que les emplois sont plus concentrés que les actifs dans le centre de l'agglomération et progressent plus par saut, avec en corollaire des zones plus marquées de très faible progression. Les espaces périphériques sont donc à dominante résidentielle, à l'exception de quelques points qui agrègent les grandes villes satellites de la région lyonnaise. La courbe des emplois cumulés est toujours située au-dessus de la courbe des actifs. Cela traduit donc, à stocks équivalents, étant donné que les deux courbes se rejoignent à 45 km, la plus forte concentration des emplois autour de la ville-centre. Par ailleurs, la courbe des actifs a un profil moins heurté que celle des emplois traduisant un remplissage plus régulier des espaces.



Graphique 4-18. Emplois et actifs résidents occupés, cumulés par unité de distance radiale

Source : Tabourin, 1995

L'analyse dynamique des localisations permet d'étudier les modifications intervenues entre les recensements de 1975 et de 1990 (cf. graphique 4-19).



Graphique 4-19. Evolution des localisations des actifs résidents occupés et des emplois entre 1975 et 1990

Source : Tabourin, 1995

Les emplois et les actifs subissent une diminution de leurs effectifs au centre de l'agglomération, puis une croissance sur les espaces périphériques qui permet de dépasser largement en 1990 le niveau de 1975, traduisant ainsi le dynamisme économique de la région urbaine. Si la croissance des emplois entre 1975 et 1990 se réalise par sauts, avec des zones de plafonnement très marquées, celle des actifs résidents occupés est beaucoup plus linéaire et affecte l'intégralité des espaces.

223. L'évolution des localisations des activités sur la région lyonnaise

La théorie économique nous enseigne que parmi les activités économiques peuvent être distinguées les activités économiques liées à la production et les activités économiques plus concernées par la satisfaction des besoins des ménages. Les premières sont considérées comme des activités fondamentales ou basiques créant des biens destinés à un marché non spécifiquement local tandis que les autres, appelées parfois activités de détail ou activités résidentielles sont plus directement liées à la consommation et aux besoins des ménages. C'est cette segmentation des activités que nous reprenons dans notre modèle (cf. chapitre 5). Les secteurs d'activités basiques regroupent globalement les activités industrielles et les services marchands destinés aux entreprises. Les activités de détail sont les activités qui répondent aux besoins de la population.

Les activités basiques qui globalement perdent des effectifs sur l'espace des 45 km, connaissent une forte chute dans la partie la plus centrale de l'agglomération (dans la ville-centre -18%, dans la première couronne -8%), suivie d'une croissance des implantations plus périphériques (deuxième couronne), puis d'une légère décroissance en grand périurbain entre les deux recensements de 1975 et de 1990 (cf. Tableau 4-21).

Tableau 4-21. Evolution des localisations des emplois basiques sur la région lyonnaise

	Taux de croissance globaux en %		
	75-82	82-90	75-90
Ville-Centre	-10	-9	-18
Première Couronne	-7	1	-7
Deuxième Couronne	27	23	56
Grand Périurbain	3	-3	0
Aire totale	-1	-1	-2

Source : Recensements de la population de 1975, 1982, 1990.

Ces nouvelles implantations s'expliquent par les évolutions différenciées du prix du foncier dans les espaces centraux et périphériques, par les besoins en espace des segments en développement du secteur industriel, par l'accès à des zones plus facilement accessibles dans les échanges extra et intra-régionaux, par le rapprochement des unités productives et des bassins de main d'oeuvre. En outre, au sein des activités basiques, la décompositions des activités industrielles et des activités de services marchands aux entreprises fait apparaître des évolutions contrastées. Les établissements industriels ont des difficultés à se développer et tendent au moins pour les plus importantes à se délocaliser sur la périphérie. Les activités tertiaires, qui concernent de très près le fonctionnement du secteur productif sont plus ou moins étroitement liées à ses localisations ce qui les différencient des services rendus aux particuliers, beaucoup plus dépendants de la population.

Les activités de détail gagnent des effectifs (+34%) entre les deux recensements de 1975 et 1990. Il s'agit d'activités liées directement à la population, et dont les localisations sont guidées par les lieux de résidence. La répartition géographique de ces activités est proche de la population mais avec une plus forte concentration sur les centres démographiques les plus importants. Ces activités se développent fortement là où la population est la plus importante. Les stratégies de localisation de ces activités obéissent fortement à des logiques de proximité du marché de consommation finale. Ainsi, globalement, les activités de détail connaissent une croissance modérée dans la ville-centre mais un développement conséquent dans les parties périphériques de l'agglomération. Globalement, la logique d'étalement urbain est la logique dominante.

Tableau 4-22. Evolution des localisations des emplois de détail sur la région lyonnaise

	Taux de croissance globaux en %		
	75-82	82-90	75-90
Ville-Centre	1	9	10
Première Couronne	23	22	51
Deuxième Couronne	38	37	89
Grand Périurbain	21	32	60
Aire totale	12	20	34

Source : Recensements de la population de 1975, 1982, 1990.

23. Répartition des prix immobiliers sur l'agglomération lyonnaise

L'observation des prix immobiliers sur la région lyonnaise se fonde sur les données recueillies par l'Observatoire des Transactions Immobilières et Foncières (OTIF) de la Communauté urbaine de Lyon. L'OTIF procède, à partir de données collectées dans les extraits d'actes notariés, fournis par les services fiscaux, à une analyse du marché foncier et immobilier. Nous disposons, grâce aux données fournies par l'OTIF, du nombre des mutations et des prix sur le périmètre de la Communauté urbaine de Lyon des maisons neuves, des maisons anciennes, du collectif neuf et du collectif ancien. Etant donné que le périmètre de la Communauté ne recouvre pas celui de l'aire d'étude, nous avons essayé de reconstituer les données au delà de ce périmètre. Ce travail s'est révélé impossible sur l'intégralité de l'aire du fait de la pauvreté et le manque d'homogénéité des données disponibles. Néanmoins sur le périmètre du schéma directeur de l'agglomération lyonnaise, les données ont pu être reconstruites d'une façon satisfaisante²¹.

En outre, du fait de l'hétérogénéité du parc immobilier selon les zones géographiques, nous avons opté pour la construction d'un indicateur synthétique de valeurs immobilières. En effet, la ville-centre est caractérisée par une concentration d'immeubles collectifs et une faible présence de maisons individuelles, alors que plus on s'éloigne du centre, plus le parc immobilier se caractérise par la forte présence de maisons individuelles.

L'observation du marché s'est faite sur la période 1990 à 1996 sur chaque catégorie de parc (collectif ancien, collectif neuf, maison ancienne, maison neuve). Pour chacune de ces catégories, un prix moyen a été calculé sur l'ensemble de cette période pondéré par le nombre de mutations observé chaque année. (Cf. annexe 4-3). Ensuite, ces prix ont été rapporté sur la moyenne observée sur l'ensemble des zones géographiques afin de construire un indicateur base 100 sur la moyenne de chaque catégorie. Enfin, les indicateurs ont été moyennés afin d'obtenir un indicateur global synthétique.

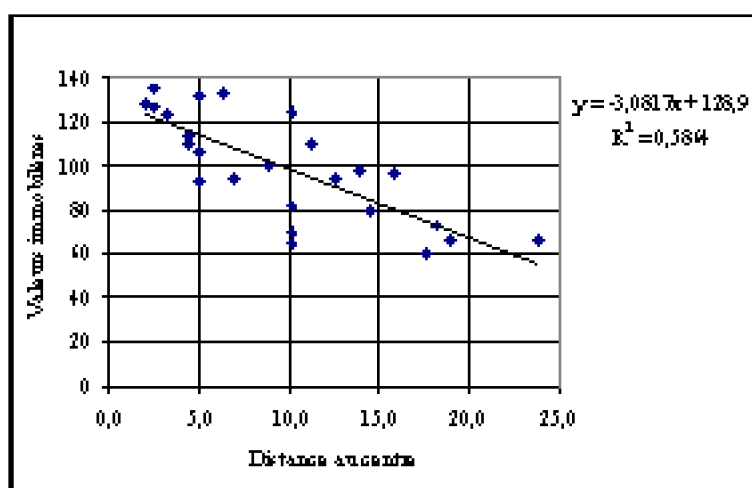
Tableau 4-23. Indicateurs des valeurs immobilières par zone géographique de l'aire d'étude

²¹ Ces données ont été recueillies principalement dans la revue « *Indicateur Bertrand Rhône-Alpes, Guide immobilier neuf et ancien* ».

N° zone	Nom de la zone	indicateur maisons neuves	indicateur maisons anciennes	indicateur collectif neuf	indicateur collectif ancien	indicateur synthétique
1	Hypercentre		129	131	122	128
2	Rive gauche		128	121	130	126
3	Lyon Sud Est	121	87	111	104	106
4	Lyon Sud		107	115	109	110
5	Lyon Sud Ouest	127	136	111	118	123
6	Lyon Ouest	127	125	103	98	113
7	Croix Rousse		155	121	127	134
8	Villeurbanne	84	83	100	103	92
9	Caluire	147	128	122	131	132
10	Vaulx en Velin - Décines	55	59	68	76	65
11	Bron	99	100	113	89	100
12	St Fons - Vénissieux	56	61	82	78	69
13	Ste Foy - La Mulatière - Pierre Bénite	72	96	107	100	94
14	Tassin - Ecully - Champagne	141	142	117	133	133
15	Secteur Neuville	112	90	92	97	98
16	Rillieux	69	91	81	84	81
17	Meyzieu - Jonage - Jons - Pusignan	59	70	81	80	73
18	Chassieu - Genas	75	88	107	115	96
19	St Priest	64	79	97	78	80
20	St Bonnet - St Laurent	59	71	70	67	66
21	Corbas - Mions - St Pierre de Chandieu	59	71	70	67	66
22	Solaize - Feyzin - St	45	65	62	68	60

N° zone	Nom de la zone	indicateur maisons neuves	indicateur maisons anciennes	indicateur collectif neuf	indicateur collectif ancien	indicateur synthétique
	Symphorien					
23	Irigny - Vernaison - Charly	87	92	64	101	93
24	Secteur Limonest - Dardilly	98	114	101	127	110
25	Secteur Mont d'Or	140	135	123	98	124

Globalement, on observe que plus l'éloignement au centre est important, plus les valeurs immobilières sont faibles. La mise en oeuvre d'une régression linéaire entre la distance au centre et les valeurs immobilières montre que la distance explique environ 58% de la variance des valeurs immobilières (cf graphique 4-20).



Graphique 4-20. Relation entre distance au centre et valeurs immobilières

L'observation des valeurs immobilières fait apparaître également le marquage social de l'agglomération. Les valeurs immobilières sont en effet plus élevées dans l'Ouest de l'agglomération qui bénéficie d'aménités naturelles et réunit une population socialement plus élevée et plus aisée que dans l'Est.

Section 3. La méthode de qualification de l'offre de transport

L'offre de transport prise en considération est l'offre routière et l'offre de transport collectif. L'offre de transport se caractérise à la fois par l'infrastructure qui est le support des déplacements et par les conditions dans lesquelles se réalise le déplacement. Les caractéristiques des conditions de transport sont le temps de déplacement, la vitesse du déplacement, le coût monétaire du déplacement, le confort, la fréquence et les temps de

correspondance pour les transports collectifs. Ces éléments forment le coût généralisé de transport. Les variables d'offre décrivent différents aspects du coût et du niveau de service par lesquels les besoins peuvent être réalisés.

Afin de décrire l'offre de transport, il est nécessaire d'avoir une structure d'analyse et de description spécifique. La fonction d'offre est définie dans la théorie micro-économique classique comme une fonction qui donne la quantité de biens qu'un producteur souhaite offrir sur le marché à un prix donné. La fonction d'offre s'exprime ainsi comme une relation entre une quantité et un prix. Cette définition est adéquate dans la plupart des analyses de la théorie de la demande du consommateur micro-économique puisque le prix en effet est la variable la plus déterminante du niveau de consommation. Cela, cependant, n'est pas le cas du transport. En effet, le domaine du transport, notamment en transport de personne en milieu urbain, a certaines caractéristiques qui nécessitent une modification de la définition de l'offre :

1.
L'offreur est souvent mal défini, et par conséquent, les comportements de l'offreur ne peuvent pas être étudiés.

2.
Ce sont les aspects non monétaires de l'offre qui sont importants. Le temps de transport est le plus important des attributs de transport. La théorie micro-économique n'apporte pas une solution satisfaisante dans la façon de traiter les nombreux attributs du transport avec la structure classique de l'offre.

3.
Ce qui détermine les attributs de l'offre de transport est le résultat de l'usage plutôt que du comportement de l'offreur. De nombreux aspects du niveau de service de transport sont directement affectés par l'évolution des flux de trafic dépendant de la façon dont les voyageurs utilisent les capacités du système de transport. Le niveau de service ne peut pas être considéré comme une offre d'attributs déterminée par un offreur. Par exemple, en transport urbain, le temps de transport est largement déterminé par le choix de l'itinéraire des usagers.

Pour ces raisons, il n'est pas approprié de restreindre la définition de l'offre de transport au concept micro-économique de la quantité offerte par un offreur à un prix donné. L'offre de transport doit être définie par un ensemble d'attributs de transport qui ont un rapport sur la quantité et la nature des activités de transport.

La description du réseau routier de voirie et celle du réseau de transport collectif est réalisée de façon séparée, chacun de ces réseaux ayant en effet des caractéristiques propres.

31. La description du réseau routier

311. La représentation physique du réseau de transport routier

Le réseau routier n'est pas représenté par une série d'arcs et de noeuds (graphe), mais

uniquement par son niveau de service global pour chaque liaison entre zones. L'offre de transport est alors codifiée pour chaque couple de zones entre lesquelles il y a une liaison routière directe (y compris les intrazones). Il s'agit toujours de zones contiguës, sauf dans le cas des zones 1 et 14, reliées directement par le tunnel de Fourvière. L'offre physique entre deux zones est définie par sa capacité horaire et sa vitesse de circulation à vide²². Une matrice de distances entre zones vient compléter cette description. La description du réseau de voirie se fonde sur des travaux de recensements des infrastructures réalisés par la DDE 69, la DRE Rhône-Alpes, les services du département du Rhône et de ceux de la Communauté urbaine. L'estimation de la structure et des capacités s'est également appuyée sur un codage du réseau actuel effectué pour l'utilisation du logiciel DAVIS (CETE de Lyon).

Les capacités ont été définies non seulement pour le passage d'une zone à une autre mais aussi en intra-zone, afin de pouvoir mesurer le niveau de saturation à l'intérieur de chaque zone. Ces capacités n'interviennent que dans le calcul des déplacements internes aux zones, les flux traversants étant, quant à eux, contraints par les capacités des frontières entre zones. Par nécessité de simplification, nous avons raisonné comme si les trafics internes et les trafics traversants avaient des conditions de circulation indépendantes. Il faut donc attribuer aux trafics internes une partie seulement des capacités de voirie de la zone (le reste étant supposé occupé par les flux traversants). Les capacités internes totales se situent entre 50 000 et 100 000 uvp/h selon les zones. Ces capacités intra-zones ont été prises de manière normative et homogène, par comparaison avec les niveaux de trafic mesurés par les enquêtes-ménages, à 15 000 uvp/h.

Les distances de zone à zone sont utilisées pour la conversion des vitesses en temps sur les liaisons entre zones contiguës. Elles sont calculées sur la base des vitesses à vol d'oiseau, augmentées de 25% pour correspondre approximativement à la réalité des itinéraires. Dans le cas des intrazones, afin de tenir compte de la prédominance de déplacements courts, le choix a été fait de privilégier une distance normative, identique pour toutes les zones, égale à 2 km.

L'objet de la description de l'offre est d'aboutir à des temps de parcours. Le passage du descriptif de l'offre aux temps de parcours origine-destination nécessite ensuite la réalisation de modules de recherche d'itinéraire et d'affectation pour l'évaluation de la congestion et le calcul de vitesses en charge (cf. chapitre 5).

312. Les descripteurs des conditions de déplacements

Nous distinguons quatre grandes catégories de descripteurs de l'offre routière :

1.
les temps de déplacement de porte à porte,
2.
les temps d'accès au réseau,

²² Il s'agit de capacité horaire et de vitesse à vide hypothétique dans la mesure où l'offre entre deux zones consiste en l'agrégation de plusieurs infrastructures qui sont parfois de nature différente.

les temps de trajets terminaux,

3.

les coûts de déplacement.

4.

3121. Les temps de déplacements de porte à porte

Ils sont observés sur la base de deux sources d'information :

sur le périmètre du schéma directeur, nous considérons les temps déclarés dans les enquêtes ménages de déplacements, temps moyen à la journée et temps à l'heure de pointe du matin. Dans le modèle ces temps sont recalculés par le module d'affectation. Les temps déclarés permettent de vérifier la bonne cohérence du module de calcul des temps de parcours.

sur le périmètre extérieur, les temps de parcours ont été estimés grâce au logiciel autoroute express. La procédure adoptée pour cette estimation a été la suivante. Nous avons défini des centroïdes de zone, et estimé la distance réseau et les temps de parcours de centroïde à centroïde. Lorsque le centroïde identifié n'était pas pris en compte dans le logiciel, nous avons alors considéré la ville ou le village le plus proche. En fonction de certaines hypothèses de vitesses affectées à chaque tronçon et de consommation d'essence, ce logiciel fournit l'itinéraire le plus rapide ou l'itinéraire le plus court exprimé en termes de temps de parcours, de distance et de coût en consommation d'essence en utilisant les algorithmes classiques de plus court chemin. Les hypothèses adoptées concernant les vitesses en km/h par type de route sont les suivantes :

Tableau 4-24. Hypothèses adaptées concernant les vitesses à vide par type de route (en km/h)

	normal	lent	urbain	urbain et lent
autoroute	113	82	81	61
chaussées séparées	97	74	64	48
nationale rapide	68	50	40	31
nationale lente	64	48	32	24
départementales	48	35	27	21
autres routes	40	31	24	18

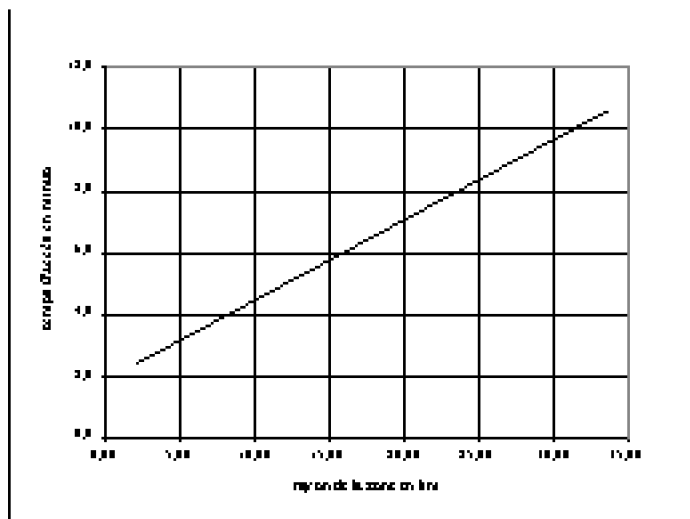
L'ensemble des temps sont recalculés comme des temps en charge sur la base d'un modèle d'affectation itératif, avec recherche d'itinéraire à chaque itération (voir chapitre suivant). Ce modèle nécessite l'application d'une relation entre la charge et la vitesse. Les enquêtes-ménages ne donnent cependant pas de données assez fines sur les situations de congestion pour pouvoir caler directement cette relation.

3122. Les temps d'accès au réseau

Ne disposant d'aucun élément sur les temps d'accès au réseau primaire, nous estimons ces temps selon certaines hypothèses. Le réseau pris en considération se base sur les infrastructures structurantes, c'est-à-dire le réseau primaire. Etant donnée la taille des zones prises en compte, nous faisons l'hypothèse que les usagers mettent un certain temps pour accéder au réseau primaire. Nous considérons que le temps d'accès au réseau primaire dépend de la taille de la zone d'origine du déplacement, ainsi que de sa densité. Ainsi, nous énonçons deux lois. La première est la relation entre la taille de la zone et le temps d'accès : plus la zone est grande, plus le temps d'accès est élevé ; la deuxième lie la densité de la zone au temps d'accès : plus la zone est dense est plus l'accès est difficile et donc plus le temps d'accès est élevé.

a. le temps d'accès au réseau primaire en fonction de la surface de la zone de départ

La détermination d'un temps d'accès en fonction de la surface de la zone de départ du déplacement vise à prendre en compte la non homogénéité des zones par rapport à leur maillage infrastructurel. Ainsi dans une petite zone, on fait l'hypothèse que l'accès au réseau routier est plus rapide en moyenne que dans une zone plus étendue. On détermine alors des temps d'accès de façon hypothétique en fonction du rayon de chaque zone. On considère que ce temps d'accès est une fonction linéaire du rayon de la zone.

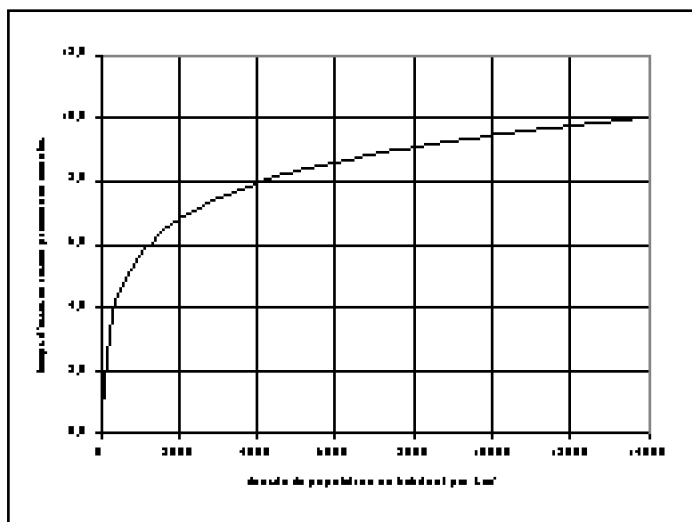


Graphique 4-21. Temps d'accès en fonction de la taille de la zone

b. le temps d'accès au réseau primaire en fonction de la densité de la zone de départ

Le temps d'accès en fonction de la densité de population vise à prendre en considération la gêne que les conducteurs peuvent rencontrer dans les centres urbains denses. On distingue deux types de gêne : l'accès à la voiture particulière, c'est-à-dire le temps de

marche à pied pour se rendre jusqu'à l'automobile, et la gêne occasionnée par la circulation élevée sur les réseaux intermédiaires dans les zones denses. On considère que ce temps d'accès est une fonction logarithmique de la densité de population.



Graphique 4-22. Temps d'accès au réseau primaire en fonction de la zone

c. le temps d'accès total

Le temps d'accès calculé en fonction de la densité de la zone et celui calculé en fonction du rayon s'oppose de façon générale. En effet, au regard de la structure de notre zonage, les zones denses sont les zones les moins étendues, et inversement. Pour obtenir le temps d'accès total, nous faisons la moyenne des deux types de temps d'accès.

3123. Les temps de trajets terminaux

Les temps de trajets terminaux sont les temps de recherche d'une place de stationnement et le temps de marche à pied à partir du lieu de stationnement jusqu'au lieu de destination finale.

a. le temps de recherche d'une place de stationnement

Nous ne disposons d'aucun élément sur les temps de recherche de place de stationnement (cette variable n'apparaît pas dans l'enquête-ménage). En ce qui concerne l'offre de places de stationnement sur l'agglomération lyonnaise, des recensements ont été menés par certains organismes. Cependant, la connaissance de l'offre reste insuffisante, notamment en ce qui concerne l'offre privée, et en particulier les places offertes au lieu de travail par l'employeur.

La modélisation du temps de recherche de stationnement s'appuie sur les travaux de Cullinane (1993). Cet auteur propose en effet un modèle dynamique de choix de stationnement. Nous n'exposons pas l'intégralité de son modèle mais uniquement la spécification de la fonction de temps moyen de recherche de stationnement. Dans son modèle, il distingue deux types de stationnement : le stationnement licite et le

stationnement illicite. Il suppose que le temps de recherche d'une place de stationnement dépend du taux d'utilisation des capacités de stationnement. Il souligne que les temps de recherche d'une place de stationnement licite et illicite sont différents. Cependant, la forme fonctionnelle, dont le fondement est purement intuitif, est de même type.

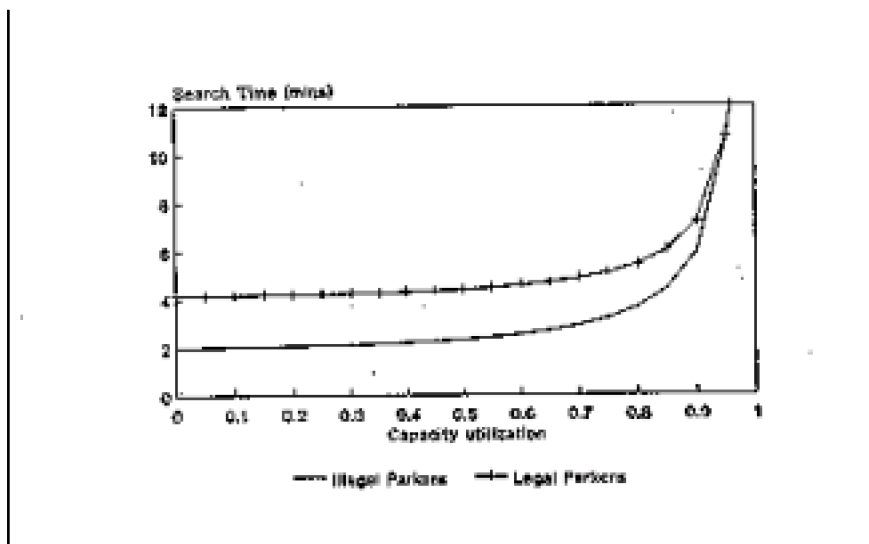


Figure 4-5. La relation fonctionnelle entre le temps de recherche d'une place de stationnement et le taux d'utilisation des capacités de stationnement.

Source : Cullinane K. « An aggregate dynamic model of the parking compliance decision », in *International journal of transport economics*, Vol. XX, N°1, February 1993.

$$ast_I(t) = \alpha_I + \beta_I \left[\frac{1}{1 - cu_I^2(t)} \right] \quad 0 \leq cu_I(t) \leq 1 \quad (4-1)$$

$$ast_L(t) = \alpha_L + \beta_L \left[\frac{1}{1 - cu_L^2(t)} \right] \quad 0 \leq cu_L(t) \leq 1 \quad (4-2)$$

avec :

$ast_I(t)$: le temps moyen de recherche d'une place illicite de stationnement,

$ast_L(t)$: le temps moyen de recherche d'une place licite de stationnement,

cu_I : le taux d'utilisation des capacités de places illicites de stationnement,

cu_L : le taux d'utilisation des capacités de places licites de stationnement,

$\alpha_I, \alpha_L, \beta_I, \beta_L$ les paramètres du modèle.

Ce modèle de temps moyen de recherche d'une place de stationnement met en évidence deux propriétés importantes. Premièrement, sa forme non linéaire signifie que la difficulté marginale pour trouver une place de stationnement augmente lorsque les capacités de stationnement diminuent. En outre, la présence d'une asymptote en y lorsque le taux d'utilisation des capacités approche l'unité, exprime le fait qu'il est parfois impossible de trouver une place de stationnement. Ces fonctions ne sont pas calées de façon empirique à cause de l'absence de données disponibles sur les temps effectifs de recherche d'une place de stationnement. Les paramètres de la relation fonctionnelle sont alors posés sur la base d'hypothèses concernant le temps minimum de recherche pour trouver une place de stationnement et le temps maximum lorsque les capacités tendent vers le seuil de saturation (avant l'abandon). Les hypothèses concernant les paramètres de la fonction de Cullinane (1993) doivent être précisées. Les résultats d'enquêtes de préférences déclarées portant sur les comportements d'usage du stationnement peuvent contribuer à mieux préciser ces indicateurs. Axhausen et Polak (1994) ont recueilli des données sur la base d'une approche de préférences déclarées en Grande-Bretagne et en Allemagne. L'objectif final de l'étude était la construction d'un modèle de choix du type de stationnement. Pour ce faire, ils devaient évaluer les paramètres relatifs à l'offre de stationnement. Ils ont sélectionné quatre facteurs : le temps d'accès, le temps de recherche d'une place de stationnement, le temps de marche à pied jusqu'à la destination finale, le coût de stationnement. L'offre de stationnement est désagrégée selon le type de stationnement proposé : le stationnement gratuit sur voirie, le stationnement payant sur voirie (horodateur), le stationnement en parc payant, le stationnement illicite. Les résultats de l'enquête menée à Karlsruhe sont présentés dans la figure suivante.

Facteurs	Valeurs des attributs		
	Bas	Moyen	Haut
stationnement gratuit sur voirie			
temps de recherche d'une place	4 min.	8 min	12 min
temps de marche à pied	5 min.	10 min	15 min
stationnement sur voirie payant (horodateur)			
temps de recherche d'une place	4 min.	8 min	12 min
temps de marche à pied	4 min.	8 min	12 min
stationnement en parc			
temps de recherche d'une place	aucun	aucun	aucun
temps de marche à pied	4 min.	8 min	12 min
stationnement illicite			
temps de recherche d'une place	aucun	3 min	5 min
temps de marche à pied	4 min.	8 min	12 min

Tableau 4-25 - Valeurs des temps déclarés dans l'enquête menée à Karlsruhe

Source : Axhausen KW., Polak JW. « Choice of parking : stated preference approach », in *Transportation Vol. 18, N°1, 1991*.

La fonction de temps de recherche de stationnement retenue exprime le temps

moyen de recherche d'une place de stationnement en fonction du taux d'utilisation des capacités globales de stationnement de la zone de destination du déplacement.

$$T_RStat_j^{VP} = \alpha + \beta \left[\frac{1}{1 - cu_j^2} \right] + \rightarrow \rightarrow (4-3)$$

Les paramètres α et β sont calés selon les hypothèses du temps minimum et maximum du temps de recherche de stationnement. Nous posons que le temps minimum est de 4 minutes et que le temps maximum est de 15 minutes. Le taux d'utilisation des capacités de stationnement est calculé comme le rapport entre le nombre de véhicule à la recherche d'une place de stationnement (demande de stationnement) et les capacités globales de stationnement (offre de stationnement).

La difficulté essentielle dans l'estimation de la fonction de recherche de stationnement réside dans la spécification et l'estimation du taux d'utilisation des capacités de stationnement. Cette difficulté est liée au manque de connaissance du parc de places de stationnement. Nous disposons d'une estimation du nombre de places globales (gratuite et payante) sur voirie sur Lyon²³ et le décompte du nombre de places payantes en parc public²⁴. Cependant, ces deux types d'informations ne reconstituent pas le parc de stationnement dans la mesure où ne sont pas pris en considération le nombre de place en parking privatif et notamment les places de stationnement offertes par les employeurs. Un moyen de contourner ce problème est de ne pas prendre en considération dans la demande de stationnement, les actifs disposant d'une place fournie par l'employeur²⁵. D'après l'enquête-ménage de 1995, les parcs d'entreprises accueillent plus d'un tiers des déplacements domicile-travail dans l'hypercentre, plus de la moitié dans le reste de Lyon-Villeurbanne et les deux-tiers ou plus en périphérie. Ainsi, dans Lyon et Villeurbanne, 48% des actifs disposent d'une place de stationnement employeur (ce pourcentage est par ailleurs très proche de l'estimation fournie par une étude du CETUR (48,4% des actifs disposent d'une place fournie par l'employeur)). Lorsque l'on considère tous les motifs de déplacements, le taux de personnes disposant d'un parc d'entreprise est de 14,7%.

Les capacités de stationnement doivent être pondérées d'un coefficient de rotation moyen des véhicules sur les places de stationnement disponibles, ceci afin de prendre en compte les flux de véhicules sur la place de stationnement (arrivées et départs). Le taux de rotation d'un parc de stationnement est le nombre de véhicules ayant utilisé une place de stationnement au cours d'une période de temps donnée. C'est le rapport entre le nombre d'arrivées dans le parking pendant un laps de temps déterminé et la capacité du parking. Une étude sur les comportements de stationnement (Bays, Christe, 1994) fait apparaître les taux de rotation suivants à Lausanne.

²³ Source : TRANSITEC, Grand Lyon, 1994.

²⁴ Source : Lyon Parc Auto.

²⁵ Cette méthode a été adoptée par Schéou (1997).

Tableau 4-25. Rotation en fonction du type de stationnement (en nombre de véhicule par jour et par place)

Type de stationnement	De	à
- parcomètre 10 min	70	90
- parcomètre 1h	15	20
- zone bleue (max 1h 30)	8	15
- garage parc en centre-ville	3	4
- garage parc d'un grand magasin en centre-ville	4	5
- parking gratuit d'un hypermarché	3	7
- zone rouge (max 15h) ou parking libre	2	3

Source : Bays P., Christe P., « Le stationnement », Cahiers TEA, N°7, Ecole Polytechnique fédéral de Lausanne, Février 1994, Lausanne.

Le taux de rotation que nous appliquons est un taux de rotation global (quelque soit le type de stationnement). Nous posons que ce taux de rotation est égal à 5 véhicules par jour et par place.

Au total, le taux d'utilisation des capacités de stationnement peut s'exprimer de la façon suivante :

$$cu_j = \frac{(T_j^{\text{Tous motifs}} * tx_{\text{parc}}) / tu^{VP}}{CSTAT_j \times tx_{\text{rotation}}} \rightarrow \rightarrow \rightarrow (4-4)$$

avec :

cu_j : le taux d'utilisation des capacités de stationnement dans la zone j ,

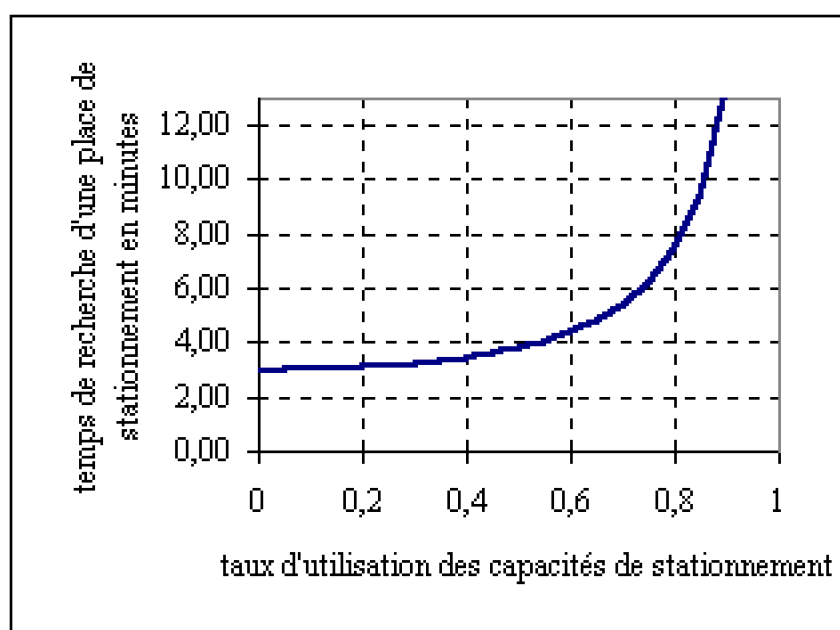
Tx_{parc} : le taux de personnes disposant d'un parc entreprise,

tu^{VP} : le taux d'occupation moyen d'un véhicule,

$CSTAT_j$: la capacité globale de stationnement dans la zone j .

Tx_{rotation} : le taux de rotation moyen des véhicules sur les places de stationnement.

La fonction de temps de recherche de stationnement adoptée a la forme suivante :



Graphique 4-23. Fonction du temps moyen de recherche d'une place de stationnement

b. le temps de marche à pied

La variable « temps de marche à pied » est renseignée dans l'enquête-ménage, mais au regard de leur représentativité, ces données ne sont pas exploitables. A l'instar de Schéou (1997), il est raisonnable de penser que le temps de marche à pied augmente avec la difficulté à trouver une place de stationnement :

$$T_Map_j^{VP} (pas\ place\ employeur) = \lambda T_RStat_j^{VP} \rightarrow \rightarrow (4-5)$$

λ est initialisé à 0,25 en considérant que le temps de marche à pied des actifs ne disposant pas de place employeur représente le quart du temps de recherche d'une place. (On suppose que les individus qui disposent d'une place employeur mettent une minute pour se rendre sur leur lieu de travail).

3124. Le coût de déplacement

a. La décomposition du coût pour l'utilisateur de la voiture particulière

La possession et l'utilisation d'une voiture particulière entraînent ou peuvent entraîner différents types de coûts pour l'utilisateur : les dépenses d'acquisition ou amortissement du véhicule, l'assurance, la carte grise, la vignette, la location d'un garage, la consommation d'essence, les dépenses d'entretien et de réparation, les péages routiers, les frais de stationnement. Ces différents coûts sont de nature différente. On distingue les coûts liés à la possession de l'automobile qui sont les coûts fixes (amortissement du véhicule, assurances, carte grise, vignette, location de garage...) et les coûts liés à l'usage de la voiture, qui sont par nature des coûts variables (carburants, frais d'entretien et réparation,

péages, parking...). En outre, à l'ensemble de ces coûts doivent s'ajouter les coûts sociaux. Cependant, si la prise en considération de l'ensemble des coûts liés à l'utilisation de la voiture particulière est indispensable dans le cadre d'une procédure d'évaluation, elle est moins pertinente dans le cadre de la modélisation des comportements de déplacements. En effet, le modèle vise à retranscrire dans ses grandes lignes les schémas de décision des individus, ainsi les coûts qui doivent être pris en compte sont les coûts ressentis par l'utilisateur.

Les dépenses théoriques liées à la voiture particulière peuvent être estimées à partir des postes de dépenses des ménages. Merlin (1991) distingue deux types de coûts. D'une part, le coût moyen qui est obtenu en divisant la totalité des coûts par le kilométrage parcouru. Le coût moyen comprend les coûts fixes liés à la possession du véhicule et à son entretien de base (achat, assurance, taxes liées à l'achat, garage) et les coûts liés à son utilisation (carburant, pneumatique, réparation, amendes, etc.). D'autre part, le coût marginal qui correspond seulement aux coûts liés à l'utilisation (carburant, pneumatique, réparation, amendes...).

Le coût moyen d'usage d'un véhicule a été estimé d'après les dépenses par poste des ménages en 1989, extrapolées en 1995 suivant l'indice de prix à la consommation, en faisant l'hypothèse que le kilométrage moyen est de 13 500 km (cf. tableau 4-27).

Tableau 4-26. Les coûts liés à la possession et à l'usage d'une automobile

	dépense moyenne en francs 1995	coût au kilomètre en francs 1995
coûts fixes	15 395	1,14
- <i>dépense d'acquisition</i>	11 373	0,84
- <i>assurances, carte grise, vignette</i>	3 747	0,28
- <i>location de garage</i>	275	0,02
coûts variables liés à l'utilisation du véhicule	9 120	0,68
- <i>carburants</i>	5 990	0,44
- <i>huile, lavage, vidange</i>	448	0,03
- <i>accessoires, pneus</i>	693	0,05
- <i>réparations</i>	1 800	0,13
- <i>péages, parkings</i>	189	0,01
coût marginal (somme des coûts d'utilisation)	9 120	0,68
coût moyen (somme des coûts fixes et coûts d'utilisation)	24 515	1,82

Source : données reconstituées à partir de INSEE Première, N° 216 - Juillet 1992, « L'automobile : 1800 francs par mois ».

D'après ces données, on estime que le coût moyen s'élève à 1,82 F/km, et que le

coût marginal se situe à 0,68 F/km²⁶.

En outre, l'analyse montre que les usagers sont myopes, c'est-à-dire qu'ils ne prennent en compte dans leurs décisions de transport qu'une partie des coûts objectifs. Ce sont les coûts ressentis ou coûts perçus.

b. Les coûts perçus par les usagers

Certains auteurs ont mené des études approfondies sur la perception des coûts liés aux déplacements en automobile. Ainsi, Brog (1980, *in* CEMT 1982) aboutit à la conclusion qu'une très faible minorité de conducteurs savent ce qu'il leur en coûte d'utiliser leur voiture, et le coût d'un déplacement en voiture « n'est pas un facteur pertinent dans le processus de décision ». Rogers, Townsend et Metcalf (1970), O'Farell et Markham (1975) et Metcalf (1978) ont successivement mené des travaux sur la question de la perception des coûts liés à l'automobile par les usagers. Ces travaux montrent que la plupart des automobilistes ne prennent en compte qu'un coût de fonctionnement marginal (basé sur la consommation d'essence). En outre, ils observent que les coûts de fonctionnement d'une voiture sont sous-estimés, c'est-à-dire que les coûts perçus sont inférieurs aux coûts marginaux techniques réels. Une étude menée par le « Transport Studies Unit » de l'Université d'Oxford sur la perception des coûts d'une voiture aboutit à formuler trois hypothèses générales²⁷ :

1.

Dans la mesure où les conducteurs calculent les coûts de fonctionnement, leurs estimations se fondent sur le seul coût de l'essence, de sorte que le coût perçu d'utilisation de la voiture pour le travail ne comprend généralement pas le coût de l'usure, de l'entretien ou de l'amortissement.

2.

Seuls les déplacements les plus réguliers et les plus fréquents, en particulier le déplacement domicile-lieu de travail, sont perçus comme ayant un coût monétaire

²⁶ Ces estimations sont sous-évaluées par rapport à celles que donne Merlin (1991) dans son ouvrage intitulé « *Géographie, économie et planification des transports* ». Il estime en effet à 2,62F/km le coût moyen et à 0,95F/km le coût marginal. Ces différences sont expliquées par la présence d'un poste supplémentaire « intérêt du capital » dont la charge s'élève à 0,33F/km, et au fait que les dépenses de réparation sont plus élevées (0,40F/km).

²⁷ Ces hypothèses se fondent sur trois grands principes : 1. Le principe de la « nécessité de savoir » : les conducteurs ne se rendent pas compte des coûts si quelqu'un d'autre règle la facture pour eux. 2. Le principe de « fréquence du coût ». Les utilisateurs ne peuvent pas avoir clairement conscience des coûts à caractère exceptionnel, en particulier ceux qu'ils ont à régler irrégulièrement ; or ce sont justement ceux dont le montant sera le plus probablement variable, notamment les coûts de réparation. Enfin, le principe du « report ailleurs du coût » ; l'absence de lien entre les coûts de possession et les coûts d'utilisation, en tant que poste du budget d'un ménage aboutit à un schéma de comportement selon lequel au moment de devoir régler une réparation imprévue, ou une prime d'assurance prévue, les automobilistes semblent habituellement procéder à un ajustement au niveau des dépenses qui ne concernent pas la voiture. La plupart des conducteurs affirment qu'ils ne peuvent pratiquement pas économiser de l'argent en utilisant moins leur voiture, ni éviter ou différer le règlement d'autres éléments des coûts fixes, à moins de prendre la décision radicale de se débarrasser de leur voiture.

théorique. Il s'ensuit que les conducteurs qui utilisent le moins leur voiture en dehors de leur travail seront ceux qui ont les notions les plus réalistes du coût total des déplacements pendant une période donnée. Mais les calculs du coût par kilomètre ne sont apparemment pas un réflexe naturel.

3.

Il est exceptionnel que les automobilistes calculent les coûts d'un déplacement occasionnel ; la plupart d'entre eux n'en ont qu'une idée que pour les voyages lointains, souvent pour les loisirs.

Nous retiendrons alors comme coût d'utilisation de la voiture un coût perçu dans la mesure où ce coût agit dans le modèle comme un élément de formation des décisions de déplacement. Nous établissons le coût marginal d'après les recommandations de Merlin (1991) c'est-à-dire à partir des dépenses de carburant majorées par excès, soit 0,50F/km. Nous avons précédemment mis en évidence que les coûts d'utilisation de la voiture était perçu pour les déplacements habituels en particulier pour les déplacements domicile - lieu de travail. Cependant, par souci de simplification, nous prenons en considération un coût perçu de déplacement en automobile uniforme quelque soit le motif de déplacement.

313. Le temps généralisé de déplacement en voiture particulière

Le coût généralisé, que nous exprimerons en temps généralisé, combine l'ensemble des coûts non monétaires et des coûts monétaires que l'usager supporte lorsqu'il se déplace. Les coûts non monétaires sont les temps de parcours, les temps d'attente, l'inconfort, la pénibilité du trajet, etc. L'estimation du coût généralisé suppose la définition de la forme fonctionnelle de ce coût. Par souci de simplicité, on emploie généralement une spécification combinant de façon linéaire les coûts de chaque nature, négligeant les termes croisés comme les phénomènes d'utilité marginale décroissante. Afin d'agréger des temps passés avec des coûts monétaires, on intègre un paramètre appelé « valeur du temps ». La valeur du temps représente la somme qu'un voyageur paierait pour économiser une unité de temps.

3131. La valeur du temps

a. Définition

Valoriser le temps revient à faire de celui-ci un objet économique. La valeur d'un objet économique naît à la fois de son utilité (la satisfaction qu'il procure et qui motive les fins) et de sa rareté relative. Pour avoir une valeur, le temps doit être utile et rare. De plus, la valeur attribuée au temps est influencée directement par la façon dont il est vécu, mais aussi par l'utilité de l'activité dont il est le support.

Goodwin (1976) rappelle que le concept de « valeur du temps » est utilisé dans les transports de deux façons différentes. La valeur du temps sert d'une part à déterminer la quantité et la nature des ressources que les pouvoirs publics devront affecter aux services de transport. Elle intervient dans le calcul de rentabilité économique d'un investissement grâce à l'évaluation des gains de temps des usagers d'une future infrastructure de

transport. Cette valeur est dite « valeur collective » du fait de son utilisation dans les calculs de rentabilité économique pour la collectivité. Elle correspond à une valeur du temps tutélaire qui est fixée par l'administration. La valeur du temps peut être utilisée, d'autre part, à expliquer les choix observés des voyageurs lorsqu'il s'agit d'allouer aux déplacements une certaine somme d'argent et de temps. Elle sert donc à expliquer le comportement du consommateur en matière de choix du mode ou d'itinéraire, plus précisément à estimer le temps ou coût généralisé entrant dans ces modèles. On appelle cette valeur «valeur individuelle » car elle est relative aux individus et construite pour expliquer leurs comportements. Cette valeur reflète le prix qu'un individu est susceptible de payer pour obtenir un gain de temps.

Le paramètre de valeur du temps transforme en unités monétaires des variables mesurées en unités de temps et vice-versa. Mathématiquement, c'est un facteur de conversion qui permet de faire une somme à la fois des contraintes de temps et d'argent. Economiquement, la valeur du temps décrit la valeur donnée par un individu par un gain de temps unitaire. La valeur du temps traduit un rapport temps sur argent. Elle correspond au taux marginal de substitution entre le temps et le coût de déplacement.

b. Identification des valeurs du temps

Quelle valeur retenir pour la valeur du temps ? La réponse à cette question est délicate. La valeur du temps ne peut pas s'observer directement comme c'est le cas pour le prix d'un bien courant qui résulte de l'observation des échanges sur un marché. Certains auteurs proposent de considérer un coefficient qui exprime la valeur du gain de production que permettrait de réaliser le temps gagné sur les déplacements pendant les heures de travail. Ceci s'applique aux déplacements pour motif travail. Ce coefficient est en général déterminé à partir des taux de salaire. Cette méthode de calcul de la valeur du temps n'a guère de fondement empirique, elle est plutôt dictée par un dogme de la théorie économique (celui de la productivité marginale de la rémunération des facteurs) que par des résultats de recherche sur les comportements. Cette méthode pose un certain nombre de difficultés, notamment la mesure de la productivité marginale des activités récréatives, d'achats, etc. Ainsi, l'usage de modèles de comportements à l'égard des choix de transport pour mesurer la valeur du temps a été privilégié. Selon Goodwin (1976) il vaut certainement mieux fonder les prédictions sur les valeurs attribuées au temps d'après ces modèles de comportements plutôt que sur celles tirées de l'application d'une théorie dont la vérification dans la réalité est douteuse. La valeur du temps se déduit dans ce cadre de la mise en oeuvre d'un modèle qui cherche à expliquer comment les usagers prennent leurs décisions de transport (se déplacer ou non, choisir tel ou tel mode, sélectionner tel ou tel itinéraire) en fonction de divers paramètres, parmi lesquels interviennent le prix et le temps. La valeur du temps est ainsi le taux de substitution entre le prix et le temps fourni pour le modèle. Le tableau suivant fournit quelques évaluation de la valeur du temps, mises en évidence en France.

Tableau 4-27. Valeurs du temps estimées en France

auteur	zone géographique	année	valeur en francs 1990	remarques
INRETS	Région parisienne (LASER)	1988	60 70 185	valeur par véhicule : motif personnel motif domicile-travail motif professionnel
CETUR	Marseille et Grenoble	1993	de 30 F à 60F	variable selon le motif
Direction des Routes	France entière	1986	47 31 49	valeur tutélaire valeurs dites révélées : valeur sans bonus en incorporant le bonus
SNCF	France entière	1989	51 130	utilisateurs de 2 ^e classe utilisateurs de 1 ^{er} classe
MATISSE	France entière	1988	71 63 188 310	voiture particulière train 2 ^e me classe train 1 ^{ere} classe avion nota : il s'agit de valeurs moyennes. La vraie valeur dépendant du revenu, du motif, de la distance...
SNCF - Air France	France entière	1988	230	valeur très variable d'une liaison à l'autre.

Source : Commissariat général du Plan (Groupe présidé par Boiteux M.) (1994), Transports : pour un meilleur choix des investissements, La Documentation Française, Paris.

Selon Boiteux (1994) les estimations des valeurs du temps font apparaître des différences significatives. La diversité des valeurs a plusieurs origines :

- La diversité et le caractère changeant des comportements,

- L'insuffisance des informations statistiques disponibles et les conséquences du libre

arbitre humain conduisent au fait que l'adaptation entre modèles et réalité est loin d'être parfaite. Aucun modèle ne s'impose par rapport aux autres, et leur diversité est grande.

Les modèles se distinguent par la forme mathématique sur laquelle interviennent les paramètres représentatifs du comportement : forme linéaire, fonction puissance, fonction box-cox, fonction CES. Aussi, la valeur du temps calculée est différente selon la forme mathématique choisie.

Les modèles se distinguent aussi par la nature des paramètres explicatifs des comportements qu'ils font intervenir ainsi que par la nature des résultats qu'ils font apparaître.

La valeur du temps que nous retenons se cale sur une valeur moyenne de 70 francs de l'heure.

3132. La spécification de la fonction de temps généralisé

Le temps généralisé est défini comme une combinaison linéaire des différents temps et coûts supporté par l'utilisateur lors du déplacement.

$$T_{Gen}^{VP} = \alpha_1 T_{Acc}^{VP} + \alpha_2 T_{RStat}^{VP} + \alpha_3 T_{Map}^{VP} + T_{Par}^{VP} + \frac{c^{VP} d}{\lambda \times 60} \rightarrow (4-6)$$

avec

T_{Gen}^{VP} : le temps généralisé en minutes,

T_{Acc}^{VP} : le temps d'accès au réseau en minutes,

T_{RStat}^{VP} : le temps de recherche de stationnement en minutes,

T_{Map}^{VP} : le temps de marche à pied en minutes,

T_{Par}^{VP} : le temps de parcours en minutes,

c^{VP} : le coût kilométrique de déplacement en francs,

d : la distance parcourue de déplacement en kilomètres,

λ : la valeur du temps en francs par heure,

$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ sont des coefficients de pondération des temps élémentaires.

Ces derniers coefficients sont des coefficients pondérateurs de pénibilité. Par mesure de simplicité, nous n'avons pas introduit de pondération différente des temps élémentaires.

32. La description du réseau de transport collectif

321. La représentation physique du réseau de transport collectif

Nous reprenons la représentation du réseau de transport collectif réalisée pour le modèle stratégique des déplacements de l'agglomération lyonnaise²⁸. Contrairement aux modèles traditionnels, qui représentent les maillons physiques du réseau de transport en commun, le modèle stratégique raisonne uniquement au niveau zonal. Les caractéristiques de l'offre de transport collectif ne sont considérées que globalement d'une zone à une autre. Ainsi, chaque couple de zones entre lesquelles il existe une liaison directe est associé à un ensemble de descripteurs. Dans la description du réseau de transport en commun trois types d'infrastructures sont distingués :

Le réseau de sites propres lourds (métro, SNCF) ;

Les autres sites propres de type « intermédiaire », comme les sites de bus protégés, les lignes de tramway, etc. ;

Le réseau en site partagé qui représente l'essentiel du réseau de surface de bus.

322. Les descripteurs des conditions de déplacements

Trois descripteurs essentiels des conditions de déplacements en transports en commun sont considérés : le temps moyen d'accès au réseau, l'intervalle de passage et le temps de parcours embarqué.

3221. le temps moyen d'accès au réseau

Le temps d'accès en minutes représente le temps moyen nécessaire pour se rendre d'un point de la zone origine à la gare ou station la plus proche permettant d'effectuer la liaison directe considérée. Il est estimé d'après la densité du réseau considéré. Ce temps dépend de la destination et de la difficulté d'accès. De façon générale, plus la zone de destination se trouve loin du centre et plus l'accès au réseau est difficile. Le temps d'accès peut correspondre en outre à différents modes : marche, deux roues, voiture, bus, voire métro. Il est évidemment impossible à calculer exactement. Les valeurs initiales ont donc été calées par ajustement sur les temps de déplacements déclarés dans les enquêtes²⁹. Ces

²⁸ Cette tâche a été confiée en particulier à la SEMALY.

temps peuvent paraître sous-estimés, car ils posent un problème de définition : en les ajustant sur les temps déclarés, on a en fait les temps d'accès moyens des personnes qui ont pris les transports collectifs ; ces temps sont forcément inférieurs aux temps moyens potentiels de tous les déplacements effectuant la liaison considérée.

3222. l'intervalle moyen de passage

Il s'agit du temps écoulé entre chaque passage en heure de pointe du matin. Ce temps sert à estimer le temps moyen d'attente. Le temps d'attente est le produit de l'intervalle par un « coefficient de régularité » dépendant du type de réseau (0,55 pour les sites propres lourds, 0,60 pour les sites propres intermédiaires, et 0,65 pour les sites partagés³⁰).

La valeur de l'intervalle découle simplement de l'offre quand il n'existe qu'une ligne de transport en commun assurant le trajet direct pour la liaison et par le mode considérés. La définition est moins évidente quand plusieurs lignes sont en concurrence. Selon les cas, l'intervalle pourra correspondre au cumul, à la moyenne ou à la meilleure des lignes. Ce choix dépend de la configuration et est laissé à l'appréciation de l'utilisateur. Plusieurs cas de figure se présentent. Supposons par exemple que deux lignes assurent la liaison directe entre deux zones données pour le mode « site propre intermédiaire », avec des intervalles de 3 et 6 minutes (soit respectivement 20 et 10 passages dans l'heure).

Si la desserte (tracés et inter-stations) des zones en extrémité par deux lignes est similaire, on considérera que l'offre se cumule, l'intervalle résultant étant de deux minutes (30 passages dans l'heure).

Si les deux lignes sont parallèles et desservent des parties différentes des zones extrémités, les usagers ne disposent pas des deux lignes, mais de l'une ou de l'autre ; une valeur moyenne sera alors plus adaptée (4 minutes, soit 15 passages dans l'heure, si les portions de zones desservies sont de poids équivalents).

Enfin, si les deux lignes sont très différentes en termes de tracé et d'intervalle, il pourra être plus représentatif de l'offre réelle de ne retenir que le meilleur des intervalles offerts (la définition du temps d'accès devra alors être cohérent avec ce choix).

3223. l'estimation du temps de parcours embarqué

En ce qui concerne l'estimation des temps de parcours, une distinction est réalisée entre les temps pratiqués sur le réseau des sites propres (site propre lourd et site propre intermédiaire) et le réseau de surface partagé.

²⁹ Si l'on veut les modifier ou en créer de nouvelles, il convient de procéder par analogie avec d'autres relations, afin d'assurer la cohérence de la description de l'offre.

³⁰ Ces valeurs correspondent aux calages du modèle TERESE sur Lyon.

a. le temps embarqué sur le réseau en site propre

Il s'agit du temps entre la station de sortie du réseau et la destination finale. Le temps de parcours embarqué est mesuré entre les stations centrales des zones extrémités. Dans le cas des liaisons intrazones, le temps est évalué en fonction du nombre d'interstations parcourues en moyenne pour les déplacements intrazones, donnée évidemment absente des statistiques, qui fait donc appel au bon sens de l'utilisateur et qui surtout nécessite une bonne cohérence entre les différentes données.

b. le temps de parcours sur le réseau en site partagé

Le réseau en site partagé ne fait pas l'objet d'une description détaillée. Ce n'est pas à l'échelle stratégique et ce serait une lourde contrainte sur la manipulation du modèle. On fait cependant l'approximation selon laquelle à chaque liaison routière correspond une liaison bus, dont la vitesse est calculée sur la base de celle de la circulation générale. Ainsi, le temps embarqué dépend des conditions de déplacement en voiture particulière. De plus, afin de pouvoir tester des mesures favorisant la circulation des bus (couloirs réservés, priorité aux feux, etc.) un coefficient de priorité peut être introduit pour chaque liaison. Ce coefficient est posé par défaut égal à l'unité.

Les vitesses commerciales des bus sont estimées sur la base de leur vitesse de circulation et des temps d'arrêt. Elles dépendent donc des paramètres suivants :

La capacité d'accélération des bus a (environ $0,7 \text{ m/s}^2$) ;

La capacité de décélération des bus d (environ 1 m/s^2) ;

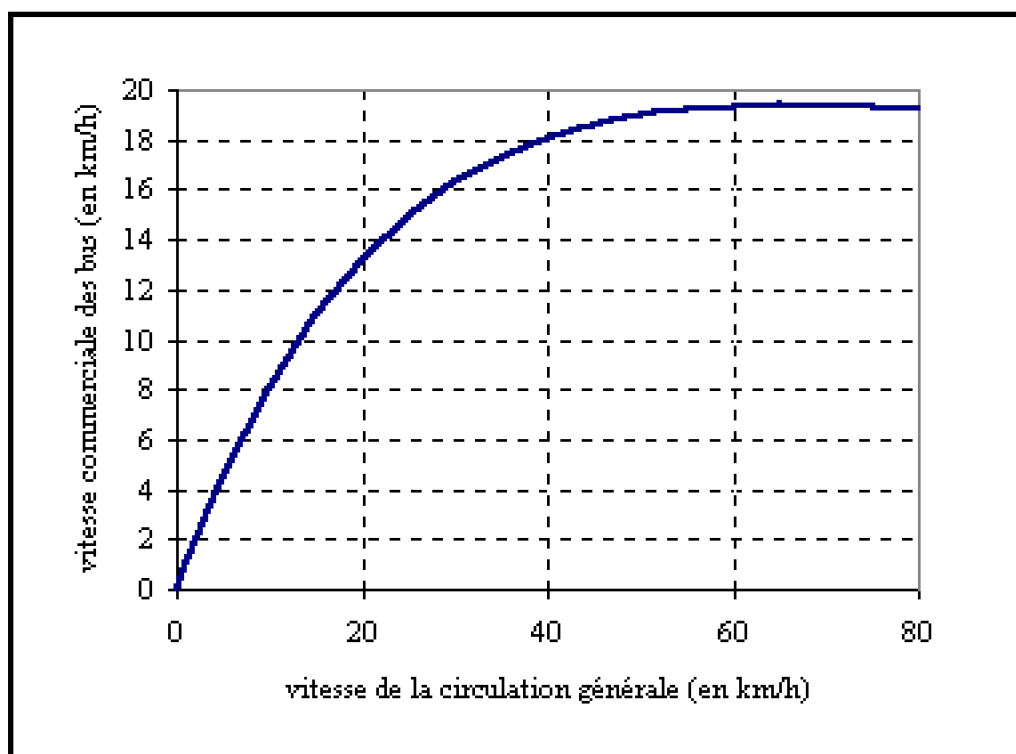
La vitesse moyenne en circulation v , prise égale à la vitesse de la circulation générale, multipliée par l'éventuel coefficient de priorité ;

La longueur moyenne entre deux arrêts l (environ 400 mètres) ;

Le temps moyen d'arrêt en station t (environ 30 secondes).

La vitesse commerciale, VC , d'un bus peut alors être approchée par :

$$VC = \frac{l}{t + \frac{l}{v} + \frac{v}{2a} + \frac{v}{2d}} \quad \rightarrow \quad \rightarrow \quad (4-7)$$



Graphique 4-24. Relation entre la vitesse de circulation des bus et la vitesse de circulation générale

3224. Le coût du déplacement

Le coût d'un déplacement (coût moyen pour l'utilisateur, toutes tarifications confondues) en première couronne (déplacements internes aux zones 1 à 14) est pris égal à la recette de la société d'exploitation des transports en commun de Lyon (SLTC) par déplacement, de l'ordre de 4,30 F pour 1995. Le coût des autres déplacements est pris, par référence au coût des abonnements SNCF, à 7,00 F pour 1995.

Pour être intégré au temps généralisé, ce coût doit être converti en unité de temps par l'application d'une valeur du temps. La valeur retenue pour 1995 est de 70F/h.

323. Le temps généralisé en transport en commun

Afin d'enrichir la représentation de la qualité de l'offre de transport en commun et de ne pas la mesurer que par le simple temps de parcours, on définit un temps généralisé qui d'une part pondère les différents éléments constitutifs du temps de parcours pour tenir compte de leur perception par l'utilisateur, et qui d'autre part prend en compte le coût monétaire du déplacement. On introduit classiquement les paramètres suivants :

- La pénibilité du temps d'accès au réseau (à pied généralement), exprimée par un coefficient multiplicateur ;

- La pénibilité du temps d'attente, exprimée par un coefficient multiplicateur ;
- La pénalité d'accès dépendant du mode (métro, tramway, bus, etc), au départ et à chaque correspondance, exprimée par un temps additionnel .

Un calage se basant sur des résultats précédents sur l'agglomération lyonnaise (modèle TERESE) a conduit à retenir les valeurs suivantes :

Tableau 4-28. Valeurs des paramètres de pénibilité en transports collectifs

paramètre	notation	valeur
coefficient de pénibilité du temps d'accès au réseau	k_1	2,0
coefficient de pénibilité du temps d'attente	k_2	1,8
pénalité d'accès dépendant du mode		
site propre lourd		5 mn
site propre intermédiaire		7 mn
site partagé		10 mn

Le temps généralisé en transport collectif s'écrit de la façon suivante :

$$T_{Gen}^{TC} = k_1 T_{Acc}^{TC} + k_2 T_{Att}^{TC} + t_{pen} + T_{Par}^{TC} - \frac{c^{TC}}{\lambda} \rightarrow \rightarrow (4-8)$$

avec

T_{Gen}^{TC} : le temps généralisé en transport collectif,

T_{Acc}^{TC} : le temps d'accès au réseau de transport collectif,

T_{Att}^{TC} : le temps d'attente,

t_{pen} : le temps de pénibilité,

T_{Par}^{TC} : le temps de parcours dans le véhicule,

c^{TC} : le coût monétaire du déplacement,

λ : la valeur du temps,

k_1, k_2 : les coefficients de pénibilité.

Depuis 10 ans, l'offre de réseau métro, mesurée par le produit du nombre de places offertes par les kilomètres parcourus (cet indicateur dit PKO permet de tenir compte à la fois de la capacité des matériels roulants et de la cadence de desserte. Pour le métro, il est passé de 1985 à 1995, de 766 millions à 1.623 millions, soit plus de 112%) a plus que doublé et la fréquentation n'a cessé d'augmenter (+54% de voyages) à un rythme, il est vrai, moins soutenu que l'offre elle-même. Intensive au centre de l'agglomération du fait du métro, l'offre de transport en commun s'est aussi développée fortement en périphérie (+14%) grâce au réseau de surface. Depuis 10 ans, 20 lignes ont été créées, le nombre de kilomètres/bus a augmenté de 10% pour la première couronne et de 20% pour la seconde. Malgré cet effort, le nombre de voyages effectués sur le seul réseau de surface a baissé depuis 10 ans de près de 20% : la réussite du métro traduit ainsi, pour l'essentiel, un report de la clientèle du réseau de surface, sans que l'offre nouvelle globale ait attiré en proportion de nouveaux voyageurs. L'effort a porté aussi sur le réseau ferroviaire, notamment de l'Ouest Lyonnais où le Conseil Général du Rhône a doublé l'offre en 1991-1992.

Conclusion du chapitre 4

La reconstitution de la donne est, comme nous venons de le voir, un travail délicat et parfois entaché d'incertitudes. La donne ainsi reconstituée sert de référence de calage au modèle.

Par ailleurs, l'analyse de l'évolution du système de déplacements et de celui des localisations sur l'aire métropolitaine lyonnaise a permis de dégager certains invariants et certains déterminants des comportements.

Le chapitre suivant a pour objet de présenter la structure générale du modèle, et d'exposer la spécification et l'estimation des différents modules qui le composent.

Chapitre 5. Le modèle, un outil d'aide à la décision stratégique de long terme

Introduction

Le modèle construit constitue un outil d'aide à la décision. En prenant une décision, on choisit une action parmi plusieurs possibles, en fonction des effets produits par chacune d'entre elles. La mesure des effets produits est réalisée par le modèle (Tabourin, 1989). Ce dernier permet d'éclairer les résultats attendus des différentes actions qui peuvent être mises en oeuvre pour influencer sur le comportement du système qu'il tend à représenter.

L'efficacité de la décision prise dépendra de la qualité du modèle utilisé. Cette qualité est en grande partie fonction de l'aptitude qu'a le modèle à représenter la réalité, en dépit de l'approximation inhérente à la démarche modélisatrice.

L'objectif du modèle est de contribuer à la mise en place de politiques de transport destinées à maîtriser la mobilité urbaine. Pour ce faire, il doit permettre, d'une part, de représenter de façon pertinente l'évolution du système de déplacements dans une perspective de long terme, et donc il doit considérer explicitement l'interaction transport-urbanisation, d'autre part, de simuler les effets de différents scénarios de politiques de transport et d'aménagement urbain. Les scénarios de simulation correspondent ainsi à une partition de l'espace des variations des avenir possibles des déplacements de personnes dans l'agglomération lyonnaise (Cf. chapitre 6). Ce modèle n'est pas un modèle de prévision. Il ne détermine pas l'évolution future des conditions de la demande de déplacements. Il ne détermine pas non plus la probabilité de réalisation future des schémas de déplacements. Comme le souligne Goux (1969, cité par Tabourin, 1989) « le moyen terme est le domaine du probable alors que celui du long terme est celui du possible ». Il est difficile d'estimer une variable à un horizon de plus de 15 ans, et de la considérer comme définitivement fixée. Un modèle de simulation permet de choisir une action parmi plusieurs possibles, en fonction des effets produits par chacune d'entre elles, dans un contexte socio-économique déterminé. Au lieu d'effectuer des expériences sur la réalité elle-même, on les entreprend sur une représentation simplifiée de celle-ci.

La première section de ce chapitre rappellera l'objet et l'objectif du modèle construit et exposera son diagramme causal ainsi que la méthode de validation retenue. Le modèle est construit en trois modules : un module de développement urbain, un module de répartition des localisations des activités urbaines et des résidents et un module de déplacements. Aussi la deuxième section présentera le module de simulation du développement urbain. La troisième section exposera le module de répartition des localisations des activités urbaines et des résidents. La quatrième section présentera le module de déplacements, coeur du modèle. Enfin, la cinquième section explicitera de quelle façon ces modules sont liés entre eux, plus précisément présentera le jeu des rétroactions dans le modèle.

Section 1. Présentation du modèle

11. Objectif du modèle

Définir l'objet et l'objectif du modèle revient à préciser les performances que l'on attend de cet instrument (Bonnaïfous, 1976). L'objet du modèle est le système des déplacements de personnes en milieu urbain. Ceux-ci sont appréhendés comme faisant partie intégrante du système urbain. Ainsi, l'influence de la structure urbaine sur les déplacements est prise en compte, ainsi que les effets, à long terme, des transformations des conditions de transport sur les localisations. A partir de cet objet, l'objectif est double : il s'agit d'une part de modéliser le fonctionnement du système de déplacements urbains et ses interactions avec le système de localisations, et d'autre part, de simuler des politiques de transport et d'aménagement urbain.

Notre travail de recherche se propose de construire un outil capable d'évaluer, de façon pertinente, les effets de politiques de transport sur le système de déplacements. Notre démarche méthodologique part du constat des limites de la méthode traditionnelle de modélisation des déplacements urbains, dite « méthode classique ». Les modèles classiques de transports ne considèrent la causalité transport - urbanisation que dans un sens unique. La répartition de la population et des activités conditionne la formation des déplacements, mais dans ces modèles, la structure urbaine est une donnée sur laquelle ne joue pas l'offre de transport. Notre recherche s'efforce ainsi à dépasser les lacunes de la méthodologie classique.

Notre objectif n'est pas d'apporter la solution miracle à la crise des déplacements urbains mais de construire un outil permettant de comparer l'efficacité de mesures de politiques urbaines. Le modèle élaboré doit pouvoir répondre aux questions suivantes :

Quels sont les effets de mesures de politiques de transport sur le système de déplacements dans une perspective de long terme ? Afin de répondre à cette question, le modèle doit être capable de simuler l'évolution de la masse des déplacements, de leur répartition modale, de leur répartition géographique. L'expérience montre en effet que les investissements en transports collectifs ne sont pas suffisants pour entraîner un report modal de l'automobile vers les transports collectifs : une approche multimodale prenant en considération le partage modal et les interactions entre les modes individuels et les modes collectifs (notamment les conflits d'usage sur la voirie) est nécessaire.

L'évolution des formes urbaines ne peut-il pas remettre en question cette efficacité ? La demande de transport est une demande intermédiaire, elle n'est demandée que pour la réalisation d'activités économiques ou privées. Les pratiques de mobilité sont produites par la distribution des activités sur un territoire. Dans une perspective de long terme, les générateurs de la mobilité peuvent se modifier et modifier la structure des déplacements. Le modèle doit considérer l'impact de la modification des formes urbaines sur la mobilité.

Quel est le rôle du contexte économique dans l'évolution du système des déplacements urbains et donc son poids dans l'efficacité des politiques de maîtrise des déplacements urbains ?

A long terme, quels peuvent être les effets des modifications du système de déplacements sur l'organisation urbaine ? Dans une perspective de long terme, les modifications des conditions de transport peuvent avoir des effets sur les localisations des activités économiques et des localisations des résidents à l'origine de la formation de la demande de déplacements. En effet, les changements des conditions de transport modifient l'accessibilité aux activités urbaines et aux résidents, un des principes directeurs des choix de localisation.

Enfin, dans une perspective de gestion globale, le modèle doit pouvoir simuler un ensemble de politiques stratégiques à l'échelle de l'agglomération.

Le domaine d'application du modèle est l'agglomération lyonnaise (France). La recherche de l'opérationnalité a des conséquences importantes quant aux hypothèses sous-jacentes au modèle et à sa spécification et conduit à une plus grande simplification de la représentation des mécanismes à l'oeuvre en comparaison à un modèle strictement analytique.

12. Les principales caractéristiques du modèle et les exigences de la recherche de l'opérationnalité

121. Les caractéristiques générales

L'évolution du système de déplacements est associée à la conjonction de plusieurs déterminants, ce qui rend complexe la gestion d'un tel système. La mise en évidence de cette complexité et des effets potentiels à long terme ont conduit à redéfinir les politiques de transport vers des orientations stratégiques (cf. chapitre introductif). Ainsi, les politiques de transport doivent être considérées dans le cadre de l'aménagement urbain et de la vie économique : pour élaborer une stratégie globale et cohérente en matière de transport, il convient de tenir compte de toutes les interactions entre l'aménagement urbain, les transports et l'économie qui ont des effets directs sur les déplacements, notamment de celles susceptibles de produire des effets en retour. Cela suppose ainsi de disposer d'outils de planification pouvant intégrer cette dimension globale et stratégique ainsi que les interactions entre système de déplacements et système de localisations.

La prise en compte des effets de long terme dans la définition des politiques de transport apparaît comme indispensable. La réactivité du système urbain doit être prise en considération. Les outils au service de la planification doivent permettre de tester des alternatives de transport sous des hypothèses contrastées de l'évolution du contexte socio-économique. Les résultats attendus ne doivent pas être des prévisions détaillées d'un futur inéluctable mais plutôt des ordres de grandeurs sur les tendances de développement connectées à des hypothèses contrastées et différentes actions de politiques de transport. La prise en compte du long terme porte une incertitude inhérente. Cela justifie que les évaluations quantitatives issues de modèles de long terme soient concernées par des niveaux spatiaux agrégés, c'est-à-dire comprenant peu de zones.

La construction du modèle reprend les grands principes des modèles interactifs présentés dans le chapitre 3. Le principe directeur est le suivant : la répartition spatiale des résidents et des activités urbaines (les générateurs de la mobilité) conditionnent la formation des déplacements. Cette demande se confronte aux conditions de l'offre physique de transport (infrastructures routières, offre de transports collectifs, conditions de compétitivité entre la voiture particulière et les transports collectifs), ce qui conditionnent la répartition modale des déplacements et l'affectation sur le réseau routier. Les temps généralisés de déplacements sont l'expression des conditions dans lesquelles se sont équilibrées l'offre et la demande de transport. Dans une perspective dynamique de long

terme, perspective dans laquelle s'inscrit le modèle, les choix de déplacements (identifiés dans le modèle par les étapes de génération, distribution spatiale, répartition modale et affectation) ne sont pas figés. Ils peuvent être remis en cause lorsque les conditions de déplacements, en termes de temps généralisés, viennent à se modifier. La structure itérative en pas à pas (le temps est découpé en pas d'un an) permet d'introduire des « boucles rétroactives » qui expriment ce phénomène. *In fine*, les modifications des temps généralisés entraînent des variations des conditions d'accessibilité et à long terme des modifications de la répartition spatiale des résidents et des activités.

Le modèle proposé présente une structure modulaire et comporte un module « développement urbain », un module « répartition spatiale de la population résidente et des activités induites » et un module « déplacements ».

La partie « **déplacements** » définit, à système d'offre de transport donné et à localisation des activités et des résidents donnée, les flux de déplacements pour chaque mode et les temps généralisés de transport. Ce module exprime « l'équilibre » du marché des transports urbains obtenu à travers les sous-modules de génération, distribution, répartition spatiale, affectation. Le module « déplacements » a les caractéristiques suivantes :

La demande de déplacements est segmentée en motifs de déplacements. On distingue les motifs résidence - travail, résidence - achat, résidence - loisir, résidence - enseignement (décomposé en trois motifs : enseignement primaire, enseignement secondaire, enseignement supérieur), et les autres motifs (ce dernier ensemble rassemble les déplacements effectués pour d'autres motifs, ainsi que les déplacements secondaires n'ayant pu être rattachés à un motif principal). A partir de cette segmentation la demande est analysée selon un individu moyen par zone. L'hypothèse implicite qui est posée est donc que les individus sont relativement homogènes dans une même zone.

Le modèle prend en considération l'ensemble du système de transport, c'est-à-dire les modes privés (en l'occurrence la voiture particulière ; les transports de marchandises n'étant pas considérés) et les modes publics, ainsi que les interactions entre ces modes ;

Le modèle présente une description simplifiée du réseau de transport. Sur la base du découpage macroscopique, les facilités de déplacements sont décrites par le biais de capacités routières zone à zone. Ces capacités sont calculées comme la somme des capacités routières reliant les deux zones considérées. Cette description, certes sommaire, permet de mettre l'accent sur les contraintes d'offre.

Le modèle a une structure modulaire. Il est composé d'un ensemble de modules décrivant le processus de choix de déplacements. Un premier module permet d'estimer d'une part le taux de mobilité et d'autre part les masses de déplacements émis et attirés

par chacune des zones de l'aire d'étude. Un deuxième module distribue ces déplacements entre chaque paire origine-destination. Un troisième module répartit les déplacements entre les modes de transport. Les déplacements effectués en véhicule particulier sont alors transformés en heure de pointe du matin et en unité de véhicule avant d'être affectés sur le réseau routier.

Le modèle fonctionne en pas à pas c'est-à-dire que l'on ne projette pas directement la situation à l'année horizon. Le système est déformé progressivement jusqu'à l'horizon du modèle. Ceci permet d'introduire une structure itérative visant à atteindre l'équilibre entre l'offre et la demande de transport. Ainsi, les choix de déplacements ne sont pas figés. Des boucles de rétroactions sont introduites visant à rendre compte de l'effet des modifications des conditions de déplacements sur les choix de déplacements. Ces rétroactions sont distinguées selon leur temporalité. Cette temporalité est en outre différente selon le motif. Alors que pour les déplacements « achats » et « loisirs », les choix de déplacements sont le plus souvent des choix quotidiens, le choix de la destination ou du mode utilisé pour le travail aura dans le temps une portée beaucoup plus considérable. De même, les choix relatifs à la localisation du lieu de résidence seront moins fréquents encore et produiront leurs effets sur une période beaucoup plus longue. Finalement, à chaque niveau temporel (court, moyen, long terme), il apparaît entre les décisions de choix des interactions à la fois : - verticales : le court terme réagissant sur le long terme, - horizontales : dans le cas d'un déplacement « achat », la décision d'effectuer le trajet, le choix du mode et la destination seront interdépendants et simultanés. Dans le présent modèle, seules les interactions verticales sont considérées. Il s'agit des rétroactions suivantes :

La rétroaction sur les itinéraires routiers : les modifications des conditions de circulation peuvent conduire les individus à changer d'itinéraire. Cette réactivité est prise en considération par le module d'affectation qui travaille avec contraintes de capacités routières ;

La rétroaction sur la répartition modale. Les modifications des conditions de déplacements peuvent conduire à un report modal ;

La rétroaction sur la destination des déplacements ;

La rétroaction sur les localisations des générateurs de déplacements qui fait appelle au modèle de répartition spatiale de la population et des activités.

La partie « **développement urbain** » est fondée sur le principe de la théorie de la base économique. Les activités basiques, dont le niveau et la localisation sont exogènes au modèle, conditionnent le développement de la population et des activités induites par le jeu de multiplicateurs.

Jusque-là aucune relation n'explique les localisations des activités ou des individus.

C'est au module « **répartition spatiale des résidents et des activités** » de le faire. La spécification des modules de répartition spatiale de la population résidente et des activités induites est relativement sommaire. Elle vise à mesurer l'impact des facteurs de coûts des déplacements à travers les indicateurs d'accessibilité sur la répartition des résidents et des activités induites.

122. Les exigences de l'opérationnalité

Comme nous l'avons brièvement exposé dans le chapitre 3, Bonnaïfous (1989) a mis en évidence trois conditions nécessaires et suffisantes de l'opérationnalité d'un modèle.

le modèle doit être cohérent, c'est-à-dire, remplir non seulement une condition triviale de cohérence interne ou de non contradiction, mais aussi remplir une condition de cohérence avec son objectif. Ce dernier point signifie une parfaite compatibilité entre la structure logico-mathématique du modèle et ses ambitions théoriques.

il doit être pertinent, c'est-à-dire conforme aux réalités (telles qu'on peut les appréhender), en particulier quant à la forme numérique des équations et quant au réseau de causalités qu'elles représentent.

il doit être mesurable, c'est-à-dire ne comporter que des variables et des paramètres susceptibles d'être estimés à partir des échantillons statistiques accessibles.

Ces conditions sont toutes nécessaires à l'opérationnalité du modèle : à défaut de cohérence, l'objectif du modèle ne saurait être atteint puisqu'il n'apporterait pas les solutions théoriques du problème posé, même par conséquent, les solutions numériques. Si le modèle n'est pas pertinent, son contenu et ses résultats, sans rapports suffisants avec la réalité sont vides de sens. Si les éléments quantitatifs ne sont pas mesurables, il n'est pas possible de vérifier la pertinence, ni de procéder aux calculs impliqués par l'objectif du modèle. Ces trois conditions forment une condition suffisante de l'opérationnalité : en effet, si le modèle est cohérent, son objectif est réalisable au plan théorique. Il l'est aussi en pratique si les grandeurs utilisées sont mesurables à partir des statistiques disponibles. Enfin, le résultat obtenu représente convenablement la réalité si le modèle est pertinent, ce que la condition de mesurabilité permet de vérifier. Au total, le modèle peut être appliqué au réel conformément à son objectif.

Ces trois conditions nécessaires et suffisantes sont cependant par nature contradictoires et déterminent ce que Bonnaïfous appelle « la problématique du modèle ». Pour répondre à l'exigence de mesurabilité, il est souvent nécessaire de réduire un modèle aux catégories disponibles du point de vue statistique, ou encore de supprimer certaines variables explicatives et d'appauvrir ainsi sa cohérence et peut-être de compromettre sa pertinence. Les données dont nous disposons (cf. chapitre 4) sont relativement riches en ce qui concerne les pratiques de déplacements des individus. Ces données sont issues des enquêtes ménages de déplacements. Cependant, elles fournissent des estimations en temps déclarés par les individus de leurs temps de

déplacement, ce qui est relativement subjectif. En outre, les données concernant les prix et les coûts urbains sont pauvres. Enfin, de façon générale, les données ne sont pas disponibles sur des séries chronologiques longues.

La recherche d'une plus grande pertinence implique d'introduire des variables ou des mécanismes supplémentaires qui posent parfois des problèmes difficilement solubles avec l'appareil logico-mathématique disponible et qui posent des problèmes de mesure. Dans notre cas, la recherche d'une plus grande pertinence est celle de la prise en compte dans une perspective de long terme de la réactivité du système urbain, par le biais de l'interaction entre système de déplacements et système de localisations. Cela conduit d'une part à intégrer des mécanismes de rétroactions entre les différentes étapes relatives aux choix de déplacements, et d'autre part, nécessite de modéliser les mécanismes de localisation des résidents et des activités urbaines. Les mécanismes de rétroactions se confrontent à l'appareil logico-mathématique mais aussi aux problèmes de mesure. En effet, aucune donnée ne permet de mesurer les temps de rétroaction. Ces derniers sont introduits dans le modèle sous forme d'hypothèses.

13. Conceptualisation, schéma causal et variables déterminantes du modèle

L'objectif du modèle est la représentation et la simulation à un horizon de long terme des déplacements de personnes à l'échelle d'une agglomération. Dans une perspective de long terme, le modèle doit tenir compte de la réactivité du système urbain. L'originalité de cette recherche réside dans l'effort qui a été fait de considérer le système des déplacements dans son ensemble et dans son inscription au sein du système urbain, en prenant en compte explicitement l'interaction entre système de déplacements et système de localisations. La conceptualisation d'un modèle peut se décomposer en quatre phases qui sont le choix des variables, leur place dans le modèle, la détermination des relations qu'elles entretiennent et la formalisation que l'on peut faire de ces relations (Tabourin, 1989). Nous allons tout d'abord présenter le schéma causal du modèle, puis les variables qui en découlent.

131. Le schéma causal du modèle

On suppose que le système de déplacements de personnes est conditionné par plusieurs déterminants majeurs :

1.
On considère que les pratiques de mobilité sont produites par la distribution des activités sur un territoire, qu'une part significative de la mobilité est contrainte et dépend d'évolutions qui s'imposent à tous (localisations des activités et des résidents, évolution des formes commerciales, etc.). Les localisations des lieux d'habitat et des lieux d'emplois sont déterminantes pour expliquer les générations de trafics.
2.
On postule également un lien étroit entre croissance du niveau de vie et croissance de la mobilité.

3.

Les choix de déplacements sont conditionnés par l'offre de transport urbain et donc par les conditions de déplacements. Les conditions de déplacements sont le résultat de la confrontation entre demande de déplacements et offre de déplacements. Le modèle se doit d'envisager cette confrontation.

4.

Enfin, dans une perspective de long terme, le fonctionnement du système de déplacements ne peut être compris sans envisager les influences réciproques de l'urbanisation et des déplacements.

Comme nous l'avons déjà précisé auparavant, le modèle se décompose globalement en trois grands modules :

- . Un module simulant les niveaux de l'activité urbaine,
- . Un module simulant la répartition des localisations des résidents et des activités économiques associées,
- . Un module de déplacements de personnes en milieu urbain.

C'est le module de déplacements de personnes qui est central dans le modèle, les autres modules visant à dynamiser le système urbain dans lequel s'inscrit l'évolution des déplacements urbains. Le schéma de la figure 5-1 présente l'architecture générale du modèle.

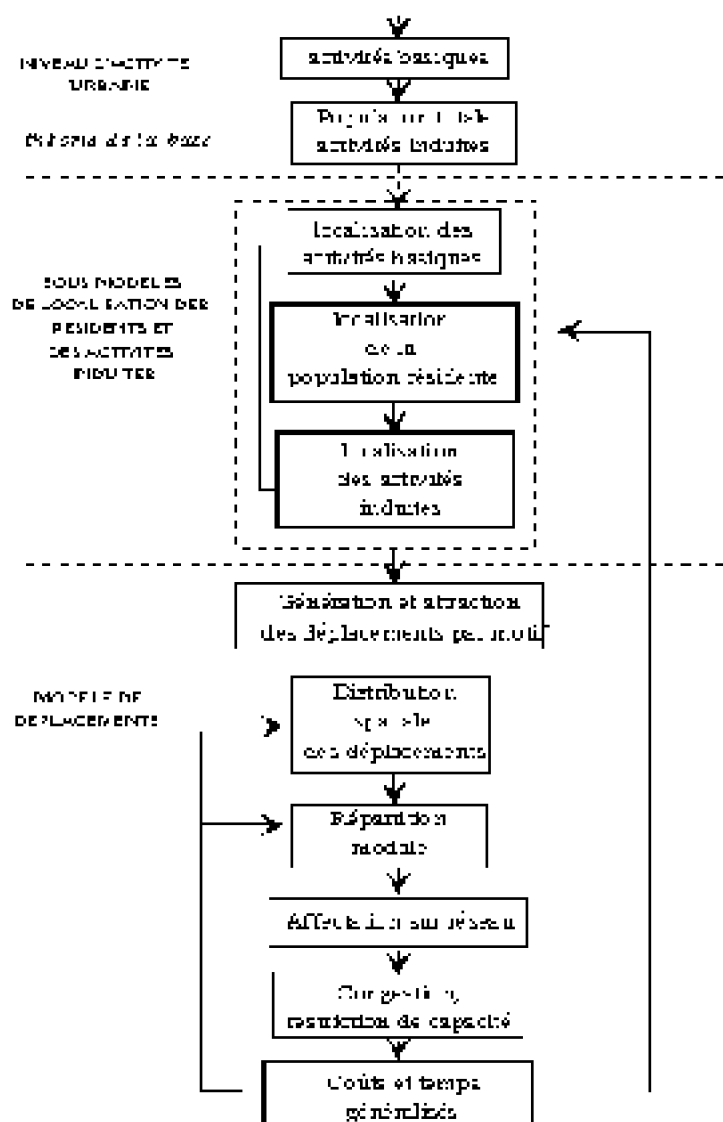


Figure 5-1. Architecture générale du modèle

L'architecture du modèle constitue le diagramme causal. Ce dernier représente l'appréhension conceptuelle du phénomène étudié. Il permet de présenter l'ensemble des relations présidant aux rapports entre les variables. Le modèle est composé d'une série de modules. La figure 5-1 représente la façon dont ces modules sont liés entre eux dans une structure itérative. A partir de celle-ci, on peut montrer que le modèle présente une structure conventionnelle à quatre étapes, couplée en amont à un modèle de développement et de structuration urbaine. Le diagramme causal doit pouvoir déboucher sur une formalisation représentative des relations qu'il exprime, afin de répondre à l'objectif final du modèle.

La lecture de la figure 5-1 se fait comme suit :

Dans un horizon de long terme, le système urbain ne peut pas être considéré comme figé. La simulation des niveaux d'activités urbaines s'inspire du principe de la théorie de

la base économique urbaine.

La détermination de la répartition spatiale des activités urbaines et des résidents s'inspirent de déterminants mis en évidence dans la littérature de l'économie urbaine (chapitre 2). La spécification des modules de répartition urbaine s'appuie sur des techniques économétriques simplifiées.

Le module de déplacements de personnes est le coeur du modèle. Il se présente sous forme séquentielle. Dans un premier temps, le taux de mobilité quotidien global ainsi que le nombre d'émissions et d'attractions par motif et par zone sont simulés. Ces déplacements sont spatialement distribués par motif entre les différentes zones formant l'aire urbaine. Pour chaque motif, les flux sont répartis entre les différents modes de transport. Enfin, ces flux sont affectés sur le réseau routier représenté par des capacités entre liaison zone à zone. Les conflits d'usage sur le réseau de surface sont pris en considération dans la mesure où les transports en commun de surface sont affectés par les dysfonctionnements de circulation sur le réseau routier. L'affectation se fait sous contraintes de capacités et tient compte des phénomènes de congestion. Le module de transport fournit d'une part des matrices de flux par motif et par mode, et d'autre part, des temps généralisés de déplacements par mode. Le module de transport est interactif. Plusieurs rétroactions sont mises en place. De façon générale, la modification des conditions de déplacement a des effets immédiats sur les choix d'itinéraires, des effets plus ou moins immédiats sur le choix du mode et des effets à moyen/long terme sur la distribution spatiale des déplacements. Une dernière rétroaction est mise en place permettant de dynamiser le système dans une perspective de long terme. Il s'agit de l'effet des modifications des conditions de transport sur la répartition des localisations résidentielles et des localisations des activités induites.

132. Les variables déterminantes

Par rapport à notre objectif de simulation des déplacements de personnes dans un horizon de long terme, nous avons dû recenser les divers éléments qui influent sur leurs compositions. Il s'agit des déterminants majeurs des déplacements de personnes cités précédemment. Une fois ces déterminants repérés, ils doivent faire l'objet d'un positionnement à l'intérieur de la logique d'organisation du système modélisé. Cette phase consiste en la partition des variables selon leurs caractéristiques communes. Trois types de variables peuvent être distinguées selon qu'elles soient prédéterminées ou exogènes, induites ou endogènes (Tabourin, 1989).

1321. Les variables prédéterminées ou exogènes

Ce sont les variables d'entrée du modèle. Elles sont fixées par l'opérateur à un certain niveau et l'utilisation du modèle n'affectera en rien leur détermination première. Elles entretiennent avec les variables endogènes des relations de cause à effet de type unidirectionnel. Elles peuvent être de deux ordres :

Les variables d'environnement : ce sont les variables qui influent fortement sur le système mais dont les déterminations se situent en dehors de celui-ci. Entrent dans cette catégorie les niveaux d'activités basiques, les localisations de ces activités, la croissance du revenu des ménages, etc. Une politique orientée uniquement sur les transports n'aura pas d'influence ou alors que marginalement sur ces variables. Par contre, toute variation significative des niveaux et de la composition de ces variables se traduira par une modification des quantités de déplacements effectués.

Les variables d'intervention : ces variables constituent ce que l'on peut appeler les commandes du système. Elles représentent les moyens d'action par lesquels les entreprises de transport ou les autorités organisatrices peuvent agir sur le système. La tarification des transports collectifs, la mise en place de nouvelles lignes de transports collectifs, les coûts pesant sur l'usage de la voiture particulière (coût de stationnement, péage urbain, etc.), le dimensionnement des capacités routières sont autant de variables de commande dans le modèle de transport.

1322. Les variables induites

Elles sont déterminées par le niveau d'autres variables. Elles se situent à l'intérieur même du système, et n'ont d'objet que par rapport à celui-ci. Elles sont déterminées, selon le cas, par les variables exogènes, ou par l'ensemble des relations qui les lient aux autres variables du système. Elles peuvent être de deux natures différentes :

Les variables intermédiaires : ce sont des variables dont la détermination représente une étape importante, incontournable dans la conception du modèle, mais qui ne répondent pas directement à l'objectif poursuivi. Elles sont à la fois effet d'un phénomène et cause d'un autre. Ce sera le cas de la répartition des localisations des résidents qui influe le schéma de déplacements des individus, et qui est elle-même conditionnée par les conditions d'accessibilité, fonction des temps généralisés, sorties du modèle de déplacements.

Les variables de sortie : elles constituent la réponse à notre problématique. Elles concernent les flux de déplacements par mode et par motif et les temps généralisés de déplacements. Dans un modèle de déplacements classique, les variables de sortie ne peuvent affecter aucune autre variable du fait de leur position finale dans le modèle. La spécificité de notre modèle est de transformer ces variables de sorties en variables d'entrées avec retard temporel. C'est le cas des temps généralisés de déplacements. C'est ce qui donne le caractère dynamique au modèle.

14. Un modèle estimé de façon économétrique

La structure du modèle est contrainte par le type d'informations dont nous disposons. La

plupart des données sont issues des enquêtes ménages de déplacements, données disponibles au niveau individuel. Toutefois, l'exigence de représentativité des données nous a conduit à privilégier un niveau agrégé d'observation à savoir des données zonales. Nous construisons donc un modèle agrégé. L'estimation du modèle s'appuie sur la méthode probabiliste de l'économétrie traditionnelle. Nous utiliserons plusieurs types de modèles économétriques : le modèle linéaire général et les modèles probabilistes discrets dont les principes sont rappelés brièvement par la suite.

141. Le cadre méthodologique du modèle linéaire général

Le cadre de l'économétrie traditionnelle présente l'avantage de pouvoir disposer de nombreuses informations sur les paramètres et le terme résiduel (variances, espérance mathématique, intervalles de confiance) qui permettent d'évaluer le risque d'erreur en termes de prévision. Le modèle linéaire général repose sur un certain nombre d'hypothèses qui doivent être respectées au mieux lors de l'application du modèle. Le respect des principales hypothèses est jugé par le calcul de divers tests statistiques présentés par la suite.

1411. Les hypothèses liées au modèle linéaire général

Soit le modèle suivant : $X = Za + e$

avec

• X est une matrice de format $(N, 1)$ représentant la variable endogène,

• Z est une matrice de format (N, p) représentant les p variables exogènes,

• a est une matrice de format $(p, 1)$ représentant les p paramètres à estimer,

• et e est une matrice de format $(N, 1)$ représentant le terme résiduel.

a. Les hypothèses structurelles

• **H1.** Il n'y a pas de restriction *a priori* sur les valeurs des coefficients a_i .

• **H2.** Il est nécessaire d'avoir plus d'observation que de paramètres à estimer. De plus, les variables exogènes ne doivent pas être colinéaires (le déterminant de la matrice ZZ' est non nul).

• **H3.** Les variables exogènes sont bornées dans leur ensemble (la matrice ZZ'/N tend vers une matrice finie quand N tend vers l'infini).

H4. Les variables explicatives sont certaines, elles sont observées sans erreur.

b. Les hypothèses stochastiques

H5. Le terme résiduel est une variable aléatoire qui intervient sous forme additive et suit une loi normale de moyenne nulle et d'écart-type .

H6. Les résidus ont tous la même variance, .

H7. La loi de probabilité des résidus est indépendante des variables exogènes,

H8. L'absence d'autocorrélation : $\varepsilon_i \neq \varepsilon_{i'}$; ε_i et $\varepsilon_{i'}$ sont indépendants en probabilité.

1412. La qualité de l'ajustement et la significativité des coefficients

La qualité de l'ajustement se mesure généralement par le coefficient de détermination multiple, noté R^2 . Les deux principaux tests de significativité des coefficients sont le test d'adéquation du modèle et le test de Student.

Le test d'adéquation du modèle a pour objectif de vérifier si le modèle a un pouvoir explicatif ou non. L'hypothèse nulle est la suivante : $H_0 : a_1 = a_2 = \dots = a_{p-1} = 0$. On calcule une statistique $F = R^2 / ((1 - R^2) * (N - p) / (p - 1))$ qui suit un F de Fisher à $p-1$ degrés de liberté. Au seuil de , si $F > F_{\alpha}$, on rejette l'hypothèse H_0 , il y a adéquation du modèle.

Le test de Student analyse la significativité de chaque coefficient. L'hypothèse de base est $H_0 : a_i \neq 0$. Si les résidus sont normaux, \hat{a}_i suit une loi normale d'espérance mathématique a et de variance $\sigma^2 (ZZ')^{-1}$.

$$|t_{ai}| = \left| \frac{\hat{a}_i - a_i}{\hat{\sigma}_{\hat{a}_i}} \right| \text{ suit alors un } t \text{ de Student à } N-p \text{ degrés de liberté.}$$

Au seuil de choisi, si $|t_{ai}| \geq t_{\alpha}$, on rejettera l'hypothèse nulle, le coefficient sera significativement différent de zéro et la variable associée à ce coefficient exercera une influence dans l'explication de la variable endogène.

1413. La vérification des hypothèses

L'ajustement du modèle linéaire général nécessite les deux premières hypothèses structurelles. Les deux suivantes ne sont pas vérifiables. En effet, il n'est pas possible d'observer ce qu'il advient de la matrice ZZ' lorsque le nombre d'observations croît indéfiniment, puisque si l'on considère des données spatiales et géographiques, le nombre d'observations est borné par l'espace et les calculs sont limités par l'outil informatique. De plus, cette hypothèse est souvent contredite dans la pratique, lorsque

l'on traite des données tendant vers l'infini. En ce qui concerne l'hypothèse H4, ce serait une illusion de croire que les variables explicatives sont observées sans erreur. Les statistiques sont le produit d'une construction, le fruit d'un processus long et le résultat dépend non seulement des conditions de recueil mais surtout de la grille conceptuelle utilisée par le statisticien ou l'organisme de production des données. Le résultat obtenu est donc rempli d'incertitudes.

142. Les modèles probabilistes discrets

L'explication et la prévision des comportements des individus ayant à choisir entre plusieurs alternatives sont décrits en termes probabilistes et font appel à des modèles probabilistes discrets. Ces modèles et leur méthode d'estimation ont été largement décrits dans le chapitre premier. Nous pouvons cependant souligner dans ces modèles sont à l'origine élaborés pour étudier des comportements individuels. Or, dans la perspective d'un modèle stratégique, nous travaillons sur des données agrégées. Ainsi, même si les modèles de choix discrets peuvent en principe être utilisés dans le cadre de données agrégées, ces modèles ne sont pas tout à fait adaptés, et le travail d'exploration de la meilleure spécification devrait mettre en évidence les difficultés dues à la contradiction entre les données macro-économiques, dont nous disposons, et le caractère micro-économique de l'environnement théorique concerné.

Section 2. Le module de simulation du développement urbain

Le modèle de développement urbain s'inspire des travaux de Lowry exposés dans le chapitre 2. Les activités urbaines sont segmentées en activités basiques et activités de détail. Ce sont les activités basiques qui sont le moteur de la croissance urbaine.

21. Les fondements théoriques : la théorie de la base

211. Les principes

Le modèle de la théorie de la base économique cherche à expliquer quels sont les principes de croissance des agglomérations. Il s'inscrit dans une perspective macro-économique, définissant la ville avant tout comme étant constituée d'un ensemble de relations économiques. Selon les tenants de la théorie de la base, la croissance urbaine serait principalement déterminée par des facteurs extérieurs à la ville, en particulier par la demande d'exportation. Le point de départ de cette conception réside dans une analyse dichotomique des fonctions urbaines, en distinguant les fonctions qui s'adressent à la demande externe, et celles, au contraire, qui s'adressent aux besoins locaux de la population. Les fonctions qui s'adressent à une demande externe déterminent les caractéristiques particulières de la ville, sa spécialisation, son rôle dans la division spatiale du travail. Les fonctions urbaines qui s'adressent à la demande interne sont celles qui permettent à la population urbaine de subsister. « La ville est perçue comme une grande machine à produire, un microcosme qui reproduit les principaux traits d'un système économique agrégé, dont la seule caractéristique est le maximum

d'ouverture au niveau du commerce extérieur. Sa production excluant les biens du secteur primaire d'une part, et les dimensions réduites du marché des biens et des facteurs de production qui l'empêchent de produire toute la gamme des biens et des services, d'autre part, font d'elle une entité exportatrice par nécessité » (Camagni, 1996). En accord avec une bonne partie de la théorie keynésienne de la croissance économique, les activités exportatrices constituent le caractère central de la dimension et de la dynamique des exportations pour la croissance de la ville. Les activités de la base qui travaillent pour le marché extérieur deviennent le moteur de la dynamique urbaine. De leur croissance dépendent en effet non seulement l'emploi et le revenu des personnes qui y travaillent, mais aussi, en raison de multiples mécanismes d'interdépendance dans la production et la consommation, l'emploi et le revenu des activités qui leur sont reliées, en amont des activités d'exportation, ainsi que l'emploi et le revenu des activités de service fournies à la population urbaine globale. Ces activités exportatrices sont appelées basiques. Elles dépendent donc de la demande extérieure, et peuvent ainsi varier de manière autonome, alors que les activités résidentielles qui dépendent des revenus distribués localement ne peuvent que s'adapter passivement.

212. L'énoncé du modèle de la base économique

H1 : On considère l'emploi total T , c'est-à-dire la population en activité dans la ville, comme formé de deux parts :

- l'emploi local, c'est-à-dire l'emploi dans les activités non basiques, NB , destiné à la satisfaction de la demande locale,

- l'emploi externe, c'est-à-dire l'emploi dans les activités basiques, B , ou secteur des exportations destinés à la satisfaction de la demande extérieure.

$$T = NB + B \quad (5-1)$$

H2 : On admet qu'il existe un rapport stable

- - entre l'emploi non basique et l'emploi total :

$$k_1 = \frac{NB}{T} \quad 0 < k_1 < 1 \quad (5-2)$$

- - entre l'emploi basique et l'emploi total :

$$k_2 = \frac{B}{T} \quad 0 < k_2 < 1 \quad (5-3)$$

Il s'ensuit que $k_1 + k_2 = 1$

- On peut définir un troisième rapport :

$r = \frac{k_1}{k_2} = \text{cste}$, ce qui correspond au ratio de l'emploi non basique sur l'emploi basique.

$$T = k_1 T + B \quad (5-4)$$

d'où

$$T = \frac{1}{1 - k_1} B = \frac{1}{k_2} B = mB \quad (5-5)$$

où m est un coefficient multiplicateur de l'emploi total, appliqué à une variable exogène qui est l'emploi dans les activités urbaines basiques.

Le passage de l'emploi aux populations exige deux hypothèses supplémentaires.

H3 : On admet la correspondance entre activités et emplois. Cette hypothèse revient à supposer une fonction de production à un seul facteur, le facteur travail, et admettre le plein emploi, soit :

$$P_a = T \quad (5-6)$$

où P_a est la population active.

H4 : le taux d'activité a de la population est supposé stable à court terme :

$$P_a = a P \quad (5-7)$$

P est la population totale urbaine.

On peut donc établir :

$$P = \frac{m}{a} B \quad (5-8)$$

Cette formulation permet la prévision démographique d'une ville à partir des prévisions de variation des emplois basiques.

Nous pouvons noter la différence qui existe entre la théorie de la base économique urbaine et le modèle de Lowry présenté au chapitre 2. En effet, dans le modèle de la théorie de la base, les emplois non basiques sont directement induits par la base économique, tandis que dans le modèle de Lowry, les emplois de détail dépendent de la demande de consommation locale. Les établissements de détail sont divisés en k groupes, les emplois de chaque type du secteur de détail sont approchés par une fonction du nombre de ménage dans la région. La population est considérée comme une fonction de l'emploi total.

Le modèle de la théorie de la base pose plusieurs difficultés et limites.

22. Difficultés et limites

221. La détermination des activités basiques

Le problème essentiel lié à ce modèle est celui de la détermination des activités basiques. Traditionnellement, seules les activités industrielles (et minières) étaient considérées comme basiques à l'échelle d'une ville ou d'une région. Les services aux entreprises, comme toutes les activités tertiaires, étaient considérées comme induits car leur localisation était censée suivre le principe des places centrales. Selon ce schéma, la localisation des services aux entreprises serait expliquée par le besoin de proximité de la clientèle et leur répartition dans l'espace donné par le seuil de demande nécessaire à leur fonctionnement (Jouvaud, 1996). Le problème majeur est que l'on ne dispose pas d'informations quantitatives relatives aux exportations urbaines, qu'elles s'expriment en valeur ou en termes d'emploi dans les productions relatives.

222. Le caractère statique du modèle

La constance des paramètres, notamment l'invariance du rapport r (emploi local / emploi basique) a été mise en doute par de nombreux auteurs, qui ont observé que r variait à la fois dans le temps et dans l'espace (Derycke, 1982). A long terme, l'utilisation du modèle se heurte au problème de la stabilité des multiplicateurs. C'est un fait empiriquement avéré qu'avec la croissance de la dimension urbaine l'importance relative des activités de service croît également en raison d'un phénomène progressif de substitution des importations (Camagni, 1996). A long terme, d'autres éléments fondamentaux du modèle changent aussi : la capacité compétitive des secteurs de spécialisation, la spécialisation même de la ville. Le fait d'utiliser à long terme le modèle de la base signifie qu'on accepte une stabilité temporelle dans la division spatiale du travail et dans les flux commerciaux territoriaux, dont l'évidence n'apparaît qu'à court terme.

23. Le renouvellement de la base économique

231. La remise en cause du schéma initial

Pour Polèse (1994) la croissance économique d'un espace dépend d'une part de la demande extérieure pour ses produits et des effets multiplicateurs qui en découlent

(schéma de la théorie de la base), d'autre part, de la capacité à long terme de cette région à renouveler constamment son offre de facteurs de production. Ce sont ces facteurs dynamiques, qui déterminent dans le temps la capacité d'exportation d'un espace par rapport à un autre. Or, il semble que le développement d'une offre spécialisée de service aux entreprises remette en cause la validité du schéma de la base économique tel qu'interprété initialement, c'est-à-dire plaçant au centre de la dynamique urbaine uniquement les activités industrielles. Certains auteurs ont travaillé sur le renouvellement de la théorie de la base économique. Le nécessaire renouvellement de cette théorie est justifié par le constat qu'en cette fin de siècle, l'économie des villes connaît de profondes transformations dues notamment au renouvellement des activités à la base de leur croissance³¹. Le développement des services aux entreprises semble ainsi jouer un rôle essentiel. Or, traditionnellement, ces activités, comme l'ensemble des activités tertiaires sont considérées comme induites dans le modèle usuel d'explication de la croissance urbaine ou régionale, à savoir la théorie de la base économique. Jouvaud (1996) pense au contraire que le développement de ces activités peut être un élément essentiel de la diversification de la base économique des métropoles et de l'explication de leur croissance. La plupart des services aux entreprises apparaissent aujourd'hui comme des éléments potentiels de l'élargissement de la base économique des métropoles. Selon Daniels (1993), la théorie de la base économique reste un modèle de référence pour décrire le processus de développement économique³².

Outre cette place des services aux entreprises parmi les activités potentiellement exportatrices, il faut en effet également souligner que les services peuvent intervenir sur le deuxième point essentiel au développement d'un espace : sa capacité à long terme à renouveler son offre de facteurs de production. Il semble notamment que la présence de services aux entreprises favorise la création de nouvelles activités, la reconversion des aires locales, l'adoption des innovations de produits et des procédés, et agit plus généralement sur la capacité d'adaptation des entreprises locales aux nouvelles conditions de production et de marché. Ainsi, des analyses récentes montrent l'existence d'une liaison positive entre les niveaux de productivité industrielle et le poids des services

³¹ Jouvaud (1996) apportent deux principales explications de cette transformation. D'une part, si pendant les deux premiers tiers du XXème siècle, tous les pays ont tiré la majorité de leur revenus et de leurs emplois de la production industrielle considérée comme le moteur des économies développées, c'est aujourd'hui le tertiaire qui occupe la majorité de la population active (60 à 75%) et concourt principalement à la formation du produit national brut. Ce développement a tout d'abord été le fait des services à la population et des services publics sous l'effet de multiples facteurs positifs dont le passage à un Etat providence, une augmentation des besoins sociaux, du pouvoir d'achat, du travail des femmes, etc. Il se manifeste principalement aujourd'hui par la croissance des services aux entreprises (+28% entre 1982 et 1990) qui occupent 11,64% de la population active française. Parallèlement à la hausse des effectifs du secteur des services aux entreprises, on assiste de surcroît à une « tertiarisation des emplois industriels », c'est-à-dire à un fort développement des « cols blancs » et des emplois de services au sein des entreprises industrielles (environ 30% des emplois). D'autre part, ces transformations touchent particulièrement les milieux urbanisés. Les services aux entreprises semblent avoir un rôle particulier du fait de leur concentration dans les villes, et plus particulièrement dans les plus grandes agglomérations. Ainsi, près de 40% des services d'études-conseils-assistance sont concentrés dans l'agglomération parisienne, et les agglomérations de plus de 300 000 habitants regroupent plus de 20% de ces emplois. Les services aux entreprises sont notamment plus concentrés que les commerces et services à la population. Leur développement affecte donc particulièrement les villes.

aux entreprises dans les régions, comme entre l'accroissement des emplois de services aux entreprises et la croissance de la productivité industrielle. Il faut effectivement souligner que la croissance des services aux entreprises correspond essentiellement à une croissance des besoins liés à la complexification croissante de l'environnement des entreprises, à des changements dans la manière de produire et de vendre, comme dans les produits eux-mêmes.

232. Des critères de sélection des activités de la base

2321. Les quotients de localisation

La méthode la plus souvent utilisée pour mesurer les exportations quand on dispose d'information sur la valeur des productions sectorielles, sur leur valeur ajoutée ou sur l'emploi, est celle des « quotients de localisation ». Cette méthode revient à comparer le rapport de chacun des secteurs au total de la production urbaine locale (c) avec le même rapport dans une aire de référence, par exemple la nation (n) et quand le rapport excède l'unité on considère la proportion excédentaire comme l'expression d'un surplus net par rapport aux exigences de la demande locale, et donc d'exportations nettes :

$$QL_i = \frac{X_{ic}}{X_c} / \frac{X_{in}}{X_n} \quad (5-9)$$

X peut être n'importe quelle variable désagrégée sectoriellement, disponible au niveau urbain et national. Nous analysons en annexe 5-1 les quotients de localisation des activités découpés en 24 types d'activités économiques et en 100 secteurs économiques (NAP 100).

2322. Le degré de proximité des activités par rapport à la population

La localisation des activités induites est censée suivre le principe des places centrales. Selon ce schéma, la localisation des services aux entreprises serait expliquée par le

³² Il souligne néanmoins que s'il est certain qu'une base industrielle compétitive en forte croissance est un élément déterminant pour une économie en bonne santé, cela n'est plus suffisant. Il faut aussi un bon environnement de services, et notamment de services aux entreprises. Savy (1994) parvient sensiblement à la même conclusion. A partir d'une analyse des données sur l'emploi des secteurs d'activités (NAP 40), il montre que malgré la diminution de l'emploi industriel, ce sont encore les activités productives qui structurent l'espace, qui produisent les différenciations les plus fortes, et donc aussi les interrelations entre régions françaises. Dans ces résultats « on peut y voir une confirmation de la « théorie de la base », qui distingue les activités dont le marché est local et les activités qui exportent vers d'autres débouchés, et sont à ce titre plus libres de leur localisation et plus légitimement destinataires des incitations dispensées au titre de l'aménagement du territoire. Parmi celles-ci, les industries jouent un rôle prépondérant. Mais « industrie » doit désormais s'entendre en un sens élargi ». L'industrie au sens large englobe non seulement les activités directement productives, mais également les activités indirectement productives en amont ou en aval nécessaires à la production (rôle des opérations de circulation, approvisionnement, redistribution, récupération des déchets ...), et la vaste gamme de « services » liés, à l'amont (recherche, études de marché, développement, ...), à l'aval (distribution, après-vente), ou parallèlement (conseil, gestion, financement).

besoin de proximité de la clientèle et leur répartition dans l'espace donné par le seuil de demande nécessaire à leur fonctionnement. A partir de l'hypothèse que les activités réparties uniformément sur le territoire sont liées à la population et contribuent faiblement à la structuration de l'espace, et que les activités qui montrent une répartition plus inégale sont celles qui façonnent le territoire, Savy (1994) a cherché à identifier ces différentes activités. Il étudie alors la répartition par branches économiques en utilisant des indicateurs de spécialisation régionale relative. Ce sont les écarts-types interrégionaux pondérés qui sont étudiés. Le résultat de cette analyse permet de dégager sur un critère purement spatial trois ensembles. D'une part, la répartition spatiale des activités distingue d'une façon forte les activités de services et les activités industrielles. D'autre part, parmi les services, le clivage est net entre les services à la population et les services aux entreprises. En outre, dans toutes les branches, industrielles et de services, l'intensité de la « relation de service » entre prestataire et client apparaît comme un facteur important de localisation et de fonctionnement spatial des branches. Les trois ensembles ainsi dégagés peuvent faire l'objet d'un commentaire particulier :

1.

Les services à la population. Ces activités se caractérisent ainsi : Elles sont présentes sur l'ensemble du territoire selon des proportions peu variables de l'emploi régional total. Les activités concernées sont uniquement ou majoritairement destinées aux particuliers, surtout en termes d'effectifs (la productivité des agents d'EDF ou des postiers travaillant pour des clients professionnels est probablement supérieure à celle de ceux travaillant pour les particuliers). Toutes ces activités sont classées parmi les « services », à l'exception du bâtiment-génie civil, et de l'électricité-gaz et eau qui associent les fonctions de fabrication et de distribution. Ces services ne sont pas immatériels (le commerce, par exemple, assure une forte activité de manutention, conditionnement, entreposage, transport des produits), ils sont marchands ou non marchands. La masse considérable des emplois ainsi localisés de façon relativement uniforme, c'est-à-dire à destination de la population, doit être soulignée. Cette masse d'activités uniformément répartie fournit ainsi à la population régionale et à l'ensemble des emplois un « socle » de services apparemment stable.

2.

Les services aux entreprises et aux particuliers. Une deuxième série de branches montre une dispersion spatiale notable. Ces branches sont toutes classées parmi les services, mais avec une clientèle qui mêle entreprises et particuliers, ces derniers étant alors souvent en position professionnelle (par exemple, déplacements d'affaires) ou paraprofessionnelle (par exemple, déplacements domicile-travail) : transport, commerce de gros non-alimentaire, location, hôtels-café-restaurants. Il s'agit donc principalement (mais non exclusivement) de services aux entreprises. Au total, il s'agit d'emplois qui montrent une répartition modérément hétérogène, liée à la fois à la densité des activités économiques qui en sont les utilisatrices et au mode et au niveau de vie de la population.

3.

Les industries. Le troisième est formé de branches dont la dispersion est élevée mais

qui ne représente moins de 37% du total. On distingue d'une part, les industries (parmi lesquelles on compte ici l'agriculture, la sylviculture, la pêche) : depuis la construction électrique, la moins inégalement répartie, à la sidérurgie, ou même à l'extraction de charbon qui ne subsiste qu'en un nombre très réduit de régions.

24. L'application au modèle

241. La détermination des activités de la base économique

La segmentation des activités dans le modèle s'inspire fortement de l'analyse de Savy (1994) réalisée sur une décomposition en NAP40, transposée à une décomposition en NAP100 et sur l'analyse proposée par Planque (1994)³³. Nous avons distingué trois types d'activités : les activités basiques, les activités liées à la base et les activités induites ou ordinaires.

Les activités basiques sont les activités industrielles.

Les activités liées à la base sont les services aux entreprises d'un type particulier, à savoir les services para-productifs (services marchands rendus aux entreprises), les services logistiques (commerce de gros, intermédiaire de commerce, transport, etc.) et les services rendus aux entreprises et aux particuliers liés aux activités productives, en amont (recherche, études de marché, etc.), en aval (distribution, après-vente) et parallèlement à la fabrication (organismes financiers, assurance, etc.).

Enfin, les activités dites **induites** ou **ordinaires** sont les activités orientées vers la satisfaction des besoins de la population. Ces activités induites ont été segmentées pour les besoins du modèle en différents grands types d'activités, sources de

³³ Planque (1994) reprend le modèle de la croissance urbaine par étape de Martin (1968). Il explique le fonctionnement économique des grandes villes par le fait que l'économie d'une métropole est constituée de quatre grandes catégories d'emplois. Ces quatre types d'activités sont : 1) Des activités exportatrices initiales, qui sont celles à partir de laquelle s'est constituée la ville (IB), 2) Des activités directement exportatrices qui sont apparues à cause de leur connexion avec les exportateurs initiaux (EB1) et exportateurs attirés dans la ville par les économies d'agglomération (EB2). 3) Des activités privées et publiques liées à la taille de l'agglomération : services publics et administrations (A), et des activités liées aux déséconomies d'agglomération (L) ; 4) Les activités ordinaires orientées vers la satisfaction des besoins de la population (O). Avec le temps, la part des activités exportatrices initiales (IB) tend à diminuer et celle des activités de type 2 et 3 à augmenter. Les activités de type 2 (qui comprennent notamment les services aux entreprises) étant également exportatrices, et les activités de type 3 étant largement liées au rang élevé de la ville dans la hiérarchie urbaine et à la complexité de son économie, on assiste donc à une diversification des activités générant la croissance. Planque précise que « c'est principalement sur le renouvellement de la base exportatrice en direction des services et des activités high-tech et sur l'évolution des activités de type A et L que devrait se porter notre attention si nous voulons comprendre et essayer d'anticiper le fonctionnement économique contemporain d'une grande métropole ». Cette approche va dans le sens d'une meilleure prise en compte des services aux entreprises comme éléments de la base économique et de la dynamique des agglomérations.

déplacements pour des motifs particuliers. La segmentation des activités liées à la population se fonde sur le type d'activité (ou motif d'activité). On distingue ainsi six types d'activités :

- les activités de commerce (liées au motif d'achat) ;
- les activités récréatives (liées au motif de loisir) ;
- les activités de l'enseignement ;
- les activités de services (essentiellement les services administratifs et de santé) ;
- les autres activités de service.

Avant d'entrer dans le détail de la formalisation, nous présentons les évolutions de cette partition des différents types d'activités.

Tableau 5-1. Evolution en taux de croissance globale de l'emploi par type d'activités (basiques, liées à la base, ordinaires).

	1975	1982	1990	évolution globale entre 75 et 82	évolution globale entre 82 et 90	évolution globale entre 75 et 90
Activités basiques	368 240	316 168	289 732	-14%	-8%	-21%
Activités liées	143 485	165 220	208 426	15%	26%	45%
Activités ordinaires	255 695	301 008	343 673	18%	14%	34%

Tableau 5-2. Evolution en taux de croissance moyens annuels de l'emploi par type d'activités (basiques, liées à la base, ordinaires).

	1975	1982	1990	évolution globale entre 75 et 82	évolution globale entre 82 et 90	évolution globale entre 75 et 90
Activités basiques	368 240	316 168	289 732	-2,2%	-1,1%	-1,6%
Activités liées	143 485	165 220	208 426	2,1%	3,0%	2,5%
Activités ordinaires	255 695	301 008	343 673	2,3%	1,6%	2,0%

Sur la période 75-90, les activités basiques perdent des emplois de façon continue, particulièrement entre 75 et 82. Les activités liées à la base ainsi que les activités ordinaires augmentent sensiblement. Le taux de croissance moyen annuel des activités liées dépasse celui des activités ordinaires entre 82 et 90.

Tableau 5-3. Evolution de la part dans l'emploi total des activités basiques, des activités liées et des activités ordinaires

	activités basiques (B)	activités liées (L)	activités ordinaires (O)	Total (T)	B/T	L/T	O/T
1975	368 240	150 120	249 060	767 420	48%	20%	32%
1982	316 168	173 196	293 032	782 396	40%	22%	37%
1990	289 732	220 182	331 917	841 831	34%	26%	39%

Avec le temps, la part des activités basiques tend à diminuer et celle des activités liées à la base à augmenter, ainsi que les activités ordinaires liées à la population. Les activités liées à la base économique comportent des services aux entreprises et détiennent la capacité à long terme de dynamiser et rendre plus compétitive la base économique et leur croissance est également liée au processus de complexification et de tertiarisation de l'économie urbaine. On assiste donc à une diversification des activités générant la croissance. Pour les besoins du modèle, et parce que seule la dynamique urbaine liée à la population est prise en considération, les activités basiques et les activités liées à la base sont regroupées.

242. Le calcul des multiplicateurs

Le périmètre sur lequel a été appliqué le modèle de la base économique urbaine couvre un cercle ayant un rayon de 45 km centré sur Lyon. Ce périmètre permet de respecter la troisième hypothèse du modèle de la théorie de la base, à savoir une correspondance entre activités et emplois. En effet, en 1990, ce périmètre comptabilise un nombre d'emplois de 841 831 et un nombre d'actifs de 832 400. L'écart est donc faible et s'élève à un peu plus de 1%.

Tableau 5-4. Répartition des emplois et de la population sur le périmètre d'étude

	Basique	Induit	Total	Population	Actifs	Taux d'actifs
1990	514 978	326 853	841 831	1 816 137	832 400	0,46
1982	501 516	280 880	782 396	1 897 374	778 628	0,41
1975	530 375	237 045	767 420	1 816 137	762 725	0,42

Les coefficients multiplicateurs standards de la théorie de la base (k_1 et k_2) sont présentés dans le tableau 5-5. k_1 qui est le rapport entre l'emploi induit et l'emploi total oscille entre 0,31 en 1975 et 0,39 en 1990. La part de l'emploi induit dans le total des emplois a tendance à augmenter. k_2 , qui est le rapport entre l'emploi basique et l'emploi total varie entre 0,69 en 1975 et 0,61 en 1990.

Tableau 5-5. Calcul des coefficients multiplicateurs standards de la théorie de la base

	k_1	k_2	m	m/a
1990	0,39	0,61	1,63	3,57
1982	0,36	0,64	1,56	3,80
1975	0,31	0,69	1,45	3,45

Nous avons choisi de désagréger les emplois induits, à l'instar du modèle de Lowry. Nous avons précédemment noté la différence entre l'approche de la théorie de la base économique urbaine et celle de Lowry. En effet, Lowry postule que ce sont les besoins de la population locale qui induisent les emplois d'activités de détail. D'après la définition que nous avons adopté des secteurs de détail, cette dernière approche semble être davantage adaptée. Ainsi, puisque la demande de consommation locale fournit le marché des établissements de ce secteur, les emplois de chaque type du secteur de détail sont approximés par une fonction du niveau de la population totale dans l'aire urbaine considérée :

$$E^k = r^k P \quad (5-10)$$

Tableau 5-6. Calcul des coefficients multiplicateurs des emplois de détail

	1975	1982	1990
EMPLOIS BASIQUES	511 725	481 388	498 158
EMPLOIS TOTAUX	767 420	782 396	841 831
POPULATION TOTALE	1 816 137	1 897 374	2 027 029
activités de commerce	71 645	76 312	79 648
r^1	0,039	0,040	0,039
activités récréatives	4 460	5 460	8 052
r^2	0,002	0,003	0,004
activités de l'enseignement	40 910	52 700	62 964
r^3	0,023	0,028	0,031
activités de services	99 975	129 660	154 025
r^4	0,055	0,068	0,076
autres activités	38 705	36 876	38 984
r^5	0,021	0,019	0,019

Ces coefficients ont été calculés à partir des données des recensements généraux de la population. On constate qu'ils varient au cours du temps. Plusieurs explications peuvent être apportées à cette évolution : la transformation de la structure de la consommation des ménages, la tertiarisation de l'économie, etc. Dans le modèle, cette évolution est simplement projetée en fonction du temps par une régression linéaire, et à défaut le coefficient est posé comme une constante.

Tableau 5-7. Projections des coefficients multiplicateurs des emplois induits

1. activités de commerce	$r^1 = \text{cste} = 0,039$	
2. activités récréatives	$r^2 = 0,001.t - 0,199$	$R^2 = 0,96$
3. activités de l'enseignement	$r^3 = 0,0006.t - 1,0936$	$R^2 = 0,97$
4. activités de services	$r^4 = 0,0014.t - 2,6799$	$R^2 = 0,96$
5. autres activités	$r^5 = -0,0001.t + 0,2895$	$R^2 = 0,79$

avec $t = \text{temps}$.

La population des ménages doit ensuite être estimée. Elle est considérée comme étant fonction de l'emploi total.

$$P = 1 / a \times T \quad (5-11)$$

Avec

P : population totale,

a : taux d'activité

T : emploi total.

La façon dont sont déterminés les niveaux de la population totale et les niveaux des emplois induits est présentée dans le schéma suivant :

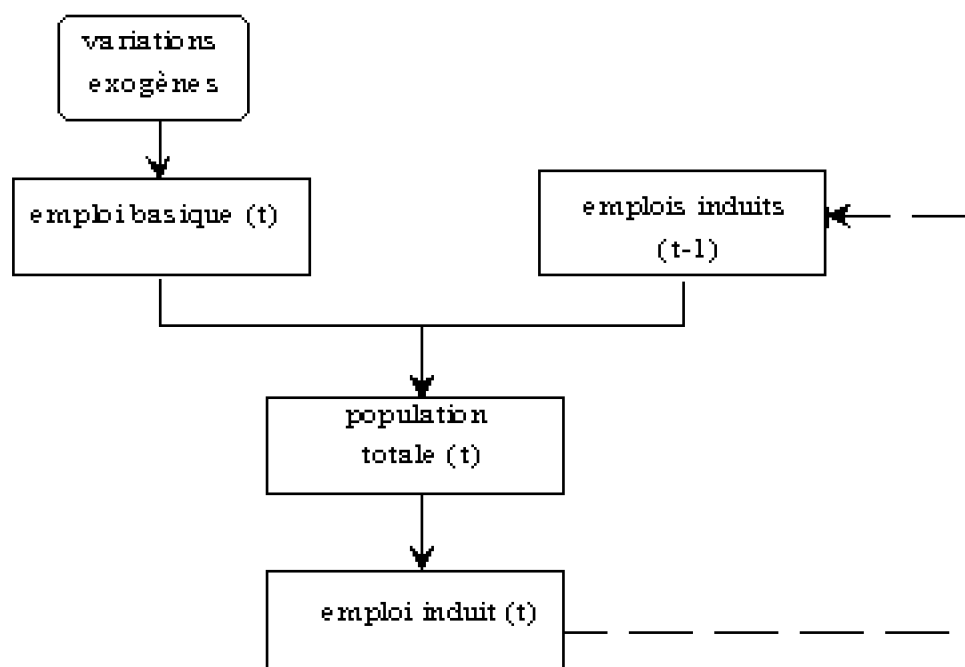


Figure 5-2. Schématisation des relations économiques entre les activités urbaines

Le niveau d'emploi basique à l'instant t est déterminé par une variation exogène. On applique un taux de croissance hypothétique du PIB. Le niveau de la population à l'instant t est déterminé par le niveau de l'emploi total décomposé en emploi basique à l'instant t et en emplois induits à l'instant $t-1$ pour cause d'indétermination. Enfin, Le niveau d'emploi induit à l'instant t est déterminé par le niveau de la population à l'instant t .

Cette première phase permet donc d'estimer l'évolution des stocks totaux d'emplois et de la population. Ces données doivent ensuite être spatialisées à travers les zones de l'aire urbaine d'étude.

Section 3. Le module de répartition des localisations des activités urbaines et des résidents

31. La localisation des activités formant la base économique de l'agglomération

Les activités formant la base économique de l'agglomération sont les activités basiques et les activités liées à la base. La localisation de ces activités n'est pas liée à des problèmes d'accessibilité aux marchés locaux, et leur niveau d'emploi dépend d'événements extérieurs à l'économie locale. Ces activités sont traitées de façon exogène au modèle et

leurs localisations sont supposées données. Des hypothèses scénariales peuvent être posées quant à l'évolution de la répartition spatiale de ces activités. L'hypothèse de base est celle de la conservation au cours du temps de la répartition spatiale de l'année de référence.

En ce qui concerne la répartition de la population et celle des activités induites, le défi consiste à modéliser les comportements de localisation et de mesurer le rôle de la variable « accessibilité » dans ces choix de localisation.

32. La localisation des résidents

Le but de ce modèle est d'expliquer et de prévoir les résultats des choix des localisations résidentielles des individus sous certaines considérations en termes de variables explicatives telles que les coûts du logement et les coûts de transport.

Tout d'abord, le module de localisation résidentielle doit pouvoir expliquer les choix résidentiels et doit pouvoir être utilisé pour prévoir ce qu'il peut se produire si les circonstances, notamment en matière de transport, changent. Il s'agit d'un modèle qui a une inscription positive. Il se démarque en effet des modèles normatifs de la micro-économie urbaine (Chapitre 2).

Le processus de choix de la localisation résidentielle est complexe. Ce choix est en effet clairement un choix spatial, mais il est influencé également par des facteurs non-spatiaux tels que le revenu et la taille des ménages effectuant ce choix.

En outre, le choix de la localisation résidentielle est un choix interdépendant à d'autres choix. Notamment, certains auteurs ont choisi de développer des modèles qui analysent conjointement le choix de la localisation résidentielle et le choix du mode de transport pour se rendre au travail. Ces deux choix sont en effet interdépendants. Par exemple, les personnes qui vivent loin des arrêts de bus ne choisiront pas de se rendre en bus à leur lieu de travail. D'un autre côté, certaines personnes peuvent délibérément choisir de se localiser près d'un arrêt de bus parce qu'ils désirent aller travailler en bus. Dans ce cas, le choix du mode de transport pour se rendre au travail influence le choix de la localisation résidentielle. Il n'existe pas de sens clair de la relation de causalité d'un choix vers l'autre. La causalité peut fonctionner dans les deux sens simultanément, les choix étant interdépendants.

Le choix de la localisation résidentielle est susceptible d'être influencé par des choix fortement liés tels que le fait d'être propriétaire ou de louer son logement, de vivre dans une maison individuelle ou dans un appartement. Par exemple, la décision de vivre dans une maison individuelle restreint les choix de localisation aux zones où il y a des maisons construites ou des terrains disponibles constructibles et ainsi influence le choix de la localisation résidentielle. Des études ont notamment montré que le désir d'être propriétaire d'une maison individuelle (Andan *et alii*, 1988) explique en grande partie les choix de localisation des ménages en zone périurbaine, là où le parc est disponible.

Une autre source de complexité est le grand ensemble de variables qui peut influencer ces choix. Le choix de la localisation résidentielle est susceptible d'être influencé non seulement par des facteurs majeurs et aisément identifiables et mesurables

tels que les coûts du logement, mais aussi par des facteurs difficiles à quantifier et fortement subjectifs tels que l'apparence, le style architectural du quartier, la possibilité de lier des connaissances. Ces facteurs peuvent être considérés comme des aménités et des externalités sociales.

Enfin, les facteurs déterminants peuvent se modifier parallèlement à l'évolution de la société. Dans de nombreux modèles urbains, le lieu de la localisation du travail constitue le noyau dur du choix de localisation résidentielle. Cependant, sous l'influence de divers déterminants, la localisation du domicile a tendance à se desserer par rapport à celle du travail pour un plus grand nombre de ménages. Andan *et alii* (1999) avancent que la localisation du domicile du ménage semble de plus en plus indépendante de la localisation du travail, à l'intérieur d'une agglomération. D'une part, tout se passe comme si l'échelle des choix de localisation des entreprises et de l'habitat devenait de plus en plus large. D'un côté, on observe un infléchissement de la politique des entreprises en matière de collecte de main d'oeuvre. La plupart de celles-ci, après avoir pendant longtemps offert à leurs employés à la fois résidence et emploi, puis s'être limitée par la suite à l'organisation de la desserte de leur bassin de main d'oeuvre, ne se préoccupait plus guère aujourd'hui de leur faciliter la proximité entre logement et emploi, dans la mesure où elles savent qu'elles trouveront aisément la main d'oeuvre nécessaire au sein d'un bassin d'emploi qu'elles auront judicieusement choisi. D'un autre côté, la production de logement, affranchie des contraintes de proximité entre emploi et résidence, suit de plus en plus sa propre logique. Les producteurs d'habitat proposent des logements là où les conditions de marché leur sont les plus favorables, tant au niveau de la rente que de la disponibilité des terrains à bâtir. D'autre part, des facteurs liés aux comportements des ménages tels que l'apparition de nouveaux modes de vie confortée par l'élévation générale du niveau de vie, l'accession à la maison individuelle, concourent à renforcer ces relâchements. La résidence est désormais davantage choisie pour ses qualités intrinsèques répondant aux nouveaux critères de modes de vie des ménages que pour la proximité au lieu de travail. On constate que les choix de localisation des ménages semblent indépendants des conséquences en termes de distance dans la mesure où, au sein de l'agglomération, l'accessibilité est de moins en moins contraignante dans un contexte où la mobilité est considérablement favorisée par le développement de la voiture qui rend accessible un bien plus grand nombre de lieux qu'auparavant. Cependant, la contrainte de temps de déplacement reste un critère déterminant.

Il n'est, bien sûr, pas possible de traiter toute cette complexité dans un unique modèle. Même si les processus par lesquels les individus effectuent leurs choix de localisation résidentielle sont suffisamment bien compris pour effectuer un traitement possible en principe, un tel modèle serait trop lourd à utiliser et extrêmement coûteux en termes de recueil de données. En outre, notre modèle ne prétend pas à reproduire toute la complexité des choix de localisation résidentielle mais à modéliser l'interaction entre système de transport et système de localisation. La variable « transport » sera donc privilégiée, et l'hypothèse « toutes choses égales par ailleurs » devra être nécessairement posée. Ainsi, il convient de définir ce qui doit être modélisé (l'objet du modèle) de façon à simplifier suffisamment le problème afin de développer un modèle opérationnel. En d'autres termes, il est nécessaire d'atteindre un compromis entre l'opérationnalité et le

réalisme. Pour ce faire, il faut poser des hypothèses simplificatrices de façon explicite.

La première hypothèse simplificatrice consiste à ne pas considérer le statut d'occupation du logement (propriétaire ou locataire) et le type de logement (appartement ou maison individuelle). Le modèle ne considère pas non plus le processus de fonctionnement du marché immobilier, et donc appréhende les prix immobiliers comme des données exogènes. Les coûts de transaction liés à la délocalisation ne sont pas non plus explicitement pris en compte. La taille du logement n'est pas non plus considérée.

Le problème du choix résidentielle dans notre modèle se résume au choix d'une zone résidentielle. Nous faisons par ailleurs l'hypothèse que le choix de la localisation résidentielle se situe en amont des autres types de choix et qu'ils conditionnent ces choix. Une hypothèse implicite est également introduite, celle du conditionnement des lieux résidentiels par les lieux de travail.

321. La tentative de mise en oeuvre d'un modèle de choix discrets de localisation des résidents

Dans un premier temps, notre démarche a été de proposer un modèle de choix de localisation résidentielle établi sur la base des modèles de choix discrets. Pour des raisons de mesurabilité et de difficultés économétriques, ce modèle n'a pas pu être mené jusqu'au bout, c'est-à-dire qu'il n'a pas pu être confronté à la donnée. Nous présentons toutefois la structure de ce modèle et ses hypothèses avant d'exposer la démarche effectivement adoptée.

Le choix est une expression des préférences. Etant donné un ensemble d'alternatives disponibles de localisations résidentielles, un ménage choisira la localisation qu'il préfère. Les préférences dépendent des attributs des alternatives disponibles et ceux des individus qui effectuent ce choix. Dans notre modèle, nous n'appliquons pas de segmentation sur les individus, nous ne considérons ainsi pas d'attributs sur les individus.

Soit z_i représentant les attributs de l'alternative i . L'hypothèse fondamentale du modèle est qu'il existe une fonction mathématique U , nommée fonction d'utilité telle que l'alternative i est préférée à l'alternative j si et seulement si $U(z_i)$ (la valeur de la fonction d'utilité correspondant aux attributs de l'alternative i) est supérieure à $U(z_j)$ (la valeur de la fonction d'utilité correspondant aux attributs de l'alternative j). En d'autres termes, l'alternative i est préférée à l'alternative j si et seulement si :

$$U(z_i) > U(z_j)$$

puisque l'individu choisit l'alternative qu'il préfère parmi toutes celles disponibles. Il s'ensuit que l'alternative i est choisie si $U(z_i)$ excède la valeur de U pour toutes les autres alternatives. Le modèle est de type probabiliste. La fonction d'utilité considérée est une fonction aléatoire. Le choix de la localisation résidentielle est, au niveau micro-économique, formulé comme un modèle de choix discret. Etant donnée la localisation du lieu d'emploi, le choix du lieu d'habitation est décrit par un modèle logit multinomial. La probabilité, une fois la décision de déménager prise, qu'un individu s'installe en zone i s'appuie sur la théorie classique de la maximisation de l'utilité du consommateur économique.

Chaque zone de localisation est associée à une fonction d'utilité. Cette fonction d'utilité est définie en fonction d'attributs relatifs à la position et aux caractéristiques de la zone. L'utilité de la localisation i est considérée comme étant la somme d'une utilité moyenne, ou systématique, utilité $V(i)$ et une variable aléatoire représentant les différences dans les préférences parmi les individus. L'utilité $U(i)$ dépend de quelques attributs relatifs à la position et aux caractéristiques de la zone. Il s'agit de :

- c_{ij} , le coût généralisé de la migration alternante entre i et j (j étant la zone de travail),
- r_i , le coût moyen du logement dans la zone i ,
- d_i , la densité du logement dans la zone résidentielle comme facteur d'aménité de la zone i ,
- $equip_i$, la densité d'équipements en commerce et activités récréatives de la zone i ,
- et d'un terme d'erreur stochastique ε_i .

$$U_{ij} = \alpha_0 + \alpha_1 c_{ij} + \alpha_2 r_i + \alpha_3 d_i + \alpha_4 equip_i + \varepsilon_i \quad (5-12)$$

α_0 , α_1 , α_2 , α_3 , et α_4 sont des paramètres à estimer.

Ce modèle, pertinent d'un point de vue théorique, n'a pas pu faire l'objet d'une estimation satisfaisante, notamment pour des raisons de mesurabilité. La difficulté essentielle est que nous ne disposons pour un certain nombre de variables uniquement de données agrégées.

322. Le modèle de répartition des localisations des résidents

Nous avons alors adopté une autre démarche. Nous avons cherché à expliquer la répartition des résidents à travers les zones de l'aire d'étude³⁴.

La variable à expliquer est P_{POP_i} est la proportion de résidents dans une zone i donnée. Différentes régressions linéaires ont été testées en fonction des diverses variables explicatives prises en compte. La spécification retenue est la suivante :

$$P_{POP_i}(t) = \alpha_1 \ln(ACC_POP_i(t-1)) + \alpha_2 \ln(P_MAG_i(t-1)) + \alpha_3 \ln(ACC_POP_i(t-1)) + \varepsilon_i \quad (5-13)$$

$ACC_POP_i(t-1)$ est l'accessibilité de la zone résidentielle i aux emplois à la période précédente. Elle est calculée comme suit :

³⁴ Il n'a été considéré que le périmètre interne de l'aire d'étude, correspondant au périmètre de l'enquête ménages de déplacements. En effet, sur le reste du périmètre, certaines informations, notamment les données sur les prix immobiliers, ne sont révélées indisponibles.

$$ACC_POF_i(t-1) = \sum_j EMP_j(t-1) \cdot \exp(-t_{ij} / \tau_1) \quad (5-14)$$

où $EMP_j(t-1)$ sont les emplois offerts totaux dans la zone j à la période précédente,

t_{ij} sont les temps généralisés tous modes entre la zone i et la zone j ,

τ_1 est le paramètre de conductance. Il est calé à partir d'un modèle gravitaire de distribution de la population en fonction de leur lieu de résidence et de leur lieu d'emploi.

$P_IMMO_i(t-1)$ est un indicateur de prix immobilier de la zone i à la période précédente,

$DENS_POP_i(t-1)$ est la densité de population dans la zone i à la période de temps précédente.

Les résultats de l'ajustement économétrique de cette spécification sont exposés dans le tableau suivant :

Tableau 5-8. Résultats de l'estimation de la répartition des localisations des résidents

	R ²	0,57	R ² aj	0,50
variables	coefficient	erreur de Student	t ratio	Pr ob > t
const	-0,0215	0,1179	-0,12	0,2570
ln (ACC_POP _i)	0,0121	0,0108	1,12	0,2762
ln (P_IMMO _i)	-0,0344	0,01678	-2,05	0,0526
ln (DENS_POP _i)	0,0125	0,0527	2,37	0,0277

La qualité de l'ajustement n'est pas très satisfaisante, le coefficient de détermination R² étant égal à 0,57 et le coefficient de détermination ajusté à 0,50. L'estimation des paramètres de régression est relativement satisfaisante au regard des tests de Student. Les signes des coefficients sont corrects. La valeur de l'accessibilité de la population à l'ensemble des emplois intervient de façon positive sur la proportion de personnes résidentes dans la zone considérée. L'introduction de la variable d'accessibilité permet d'intégrer le rôle du système de transport sur les schémas de localisation résidentielle. Ainsi, à une structure spatiale de la distribution des emplois donnée, une augmentation des temps généralisés de transport induit une perte d'accessibilité ce qui agit négativement sur l'attractivité de la zone et sur le nombre de personnes susceptibles de s'y localiser. La valeur de la densité de la population intervient de façon positive sur la proportion des personnes résidentes dans une zone donnée. Enfin, les indicateurs des prix immobiliers interviennent négativement sur la répartition des résidents dans les

espaces urbains. Plus la zone résidentielle présente des prix immobiliers élevés et moins les individus seront enclin à s'y localiser. Ainsi, la proportion de résidents dans la zone i croît avec le logarithme de l'accessibilité dont bénéficient les résidents aux emplois dans l'agglomération, elle croît avec le logarithme de la densité de population dans la zone i et décroît avec le logarithme de l'indicateur des prix immobiliers de la zone i . L'accessibilité et les valeurs immobilières interviennent en sens inverse.

Au regard de la qualité médiocre de l'ajustement et parce que la répartition spatiale de la population ne peut être totalement envisagée de façon déterministe, seulement un quart de la répartition spatiale de la population est considéré comme étant expliquée de cette façon. Les trois-quarts restant font l'objet d'hypothèses scénariales. D'autres régressions non retenues ont été estimées, ces résultats sont exposés dans l'annexe 5-2).

33. La localisation des activités liées aux besoins de la population

Parce que les activités induites ont une clientèle locale, les niveaux d'emplois sont supposés étroitement liés à la croissance de la population locale, et leur choix de localisation est supposé fortement contraint par des problèmes d'accès aux résidents locaux. La répartition des activités induites est expliquée par le besoin de proximité de la clientèle. Par ailleurs, l'installation d'activités induites dans un lieu donné peut être découragée par des prix immobiliers élevés³⁵. Enfin, la proximité d'autres activités peut favoriser l'installation d'activités bénéficiant ainsi de la présence d'une clientèle potentielle. Ainsi, la répartition des activités induites est supposée fortement contrainte premièrement par des problèmes d'accès aux résidents locaux, deuxièmement par les valeurs immobilières, et enfin par le nombre de personnes employées à proximité. Nous envisageons donc *a priori* trois variables déterminantes : l'accessibilité dont bénéficient les activités induites dans la zone considérée à la population résidente de l'agglomération, la valeur des prix immobiliers de la zone considérée et la densité d'emplois offerts dans la zone considérée.

331. La répartition des emplois de commerces

La spécification estimant la proportion d'emplois de commerce dans une zone donnée est la suivante :

$$PROX_i(t) = \alpha_0 + \alpha_1 ACC_COM_i(t-1) + \alpha_2 \ln(P_DENS_i(t-1)) + \alpha_3 \ln(COST_RENT_i(t-1)) + \varepsilon_{it} \quad (5-15)$$

avec $ACC_COM_i(t-1)$ l'accessibilité dont bénéficient les emplois de commerce à la population résidente à la période précédente,

$$ACC_COM_i(t-1) = \sum_{j=1}^J POP_j(t-1) \cdot \exp(-t_{ij}/\tau_2) \quad (5-16)$$

³⁵ La distribution des prix immobiliers des locaux tertiaires est supposée être identique à celle des prix immobiliers résidentiels.

$POP_j(t-1)$ la population résidente en zone j à la période précédente,

t_{ij} le temps généralisé tous modes entre i et j ,

τ_2 le paramètre de conductance, calé à partir du modèle de distribution des déplacements pour achats.

$P_{IMMO_i}(t-1)$ sont les prix immobiliers dans la zone i à la période de temps précédente.

$DENS_EMP_i(t-1)$ la densité des emplois dans la zone i à la période précédente.

Tableau 5-9. Résultats de l'estimation de la répartition des emplois de commerce

	R ²	0,73	R ² aj	0,70
variables	coefficient	erreur de Student	t ratio	Pr ob > t
Const ₂	-0,332	0,1165	-2,85	0,0096
ln (ACC_COM _i)	0,0452	0,0121	3,73	0,0012
ln (P_IMMO _i)	-0,0110	0,0158	-0,70	0,4924
ln (DENS_EMP _i)	0,0027	0,0052	0,52	0,6094

D'autres régressions ont été également testées, le résultat de ces estimations est proposé en annexe 5-2.

L'ajustement est relativement satisfaisant avec un R² ajusté de 0,70. Les signes des coefficients des variables déterminantes sont corrects. De la même façon que pour l'estimation de la répartition de la population résidente, on considère que seulement un quart de la répartition des emplois de commerce est expliqué par cet ajustement. Les trois quart restants sont supposés dépendre de logique plus globale de la ville, et dans le modèle, font l'objet d'hypothèses scénariales.

332. La répartition des emplois de services

En ce qui concerne la répartition des emplois de services aux particuliers,, l'analyse des régressions montre que la variable des prix immobiliers n'est pas significative et pertinente (elle est associée à un signe positif de son coefficient).

La spécification retenue est la suivante :

$$POP_{i,j}(t-1) = \alpha_1 \ln(ACC_SERV_i(t-1)) - \beta_1 \ln(DENS_EMP_i(t-1)) - const. \quad (S-17)$$

avec $ACC_SERV_i(t-1)$ l'accessibilité dont bénéficient les emplois de services administratifs dans la zone i à la population résidente à la période précédente,

$$ACC_SERV_i(t-1) = \sum_j POP_j(t-1) \cdot \exp\left(-\frac{t_{ij}}{\tau_3}\right) \quad (5-18)$$

$POP_j(t-1)$ la population résidente en zone j à la période précédente,

t_{ij} le temps généralisé tous modes entre i et j ,

τ_3 calé à partir d'un modèle gravitaire de distribution des déplacements pour le motif correspond.

$DENS_EMP_i(t-1)$ la densité des emplois dans la zone i à la période précédente.

Tableau 5-10. Résultats de l'estimation de la répartition des emplois de services

	R ²	0,56	R ² aj	0,52
variables	coefficient	erreur de Student	t ratio	Pr ob > t
Const ₃	-0,4407	0,1663	-2,65	0,0146
$\ln(ACC_SERV_i)$	0,0465	0,0228	2,04	0,0538
$\ln(DENS_EMP_i)$	-0,0067	0,0084	0,80	0,4348

De la même façon que pour les emplois de commerce, on considère que seulement un quart des emplois de services est expliqué par cette relation.

333. La répartition des emplois récréatifs

La répartition des emplois récréatifs suit le même schéma que celle des emplois de commerce, présentant toutefois un ajustement nettement moins satisfaisant.

$$P_{LOIS_i}(t) = a_1 \ln(ACC_LOIS_i(t-1)) + b_1 \ln(POP_j(t-1)) + c_1 \ln(DENS_LOIS_i(t-1)) + const_4 \quad (5-19)$$

avec $ACC_LOIS_i(t-1)$ l'accessibilité dont bénéficient les emplois récréatifs dans la zone i à la population résidente à la période précédente.

$$ACC_LOIS_i(t-1) = \sum_j POP_j(t-1) \cdot \exp\left(-\frac{t_{ij}}{\tau_4}\right) \quad (5-20)$$

$POP_j(t-1)$ la population résidente en zone j à la période précédente,

τ_4 calé à partir d'un modèle gravitaire de distribution des déplacements pour le motif

correspond.

$P_IMMO_i(t-1)$ sont les prix immobiliers dans la zone i à la période de temps précédente.

$DENS_EMP_i(t-1)$ la densité des emplois totaux dans la zone i à la période de temps précédente.

Tableau 5-11. Résultats de l'estimation de la répartition des emplois récréatifs

	R ²	0,62	R ² aj	0,57
variables	coefficient	erreur de Student	T ratio	Pr ob > t
Const ₄	-0,3691	0,2352	-1,57	0,1315
ln(ACC_LOIS _i)	0,0335	0,0242	1,38	0,1809
ln(P_IMMO _i)	-0,0011	0,0280	-0,04	0,9678
ln(DENS_EMP _i)	0,01401	0,0101	1,39	0,1798

On remarque cependant que la variable des prix immobiliers, même si elle présente une valeur de signe de son coefficient correcte, n'est pas significative. De la même façon que précédemment, seulement un quart la répartition spatiale des emplois récréatifs est expliquée de cette façon.

334. La répartition des emplois de l'enseignement

La répartition spatiale des emplois de l'enseignement est expliquée de la façon suivante :

$$P_{ENSE_i}(t) = \alpha_5 \ln(ACC_ENSE_i(t-1)) + \alpha_6 \ln(P_IMMO_i(t-1)) + \alpha_7 \ln(DENS_EMP_i(t-1)) + const_5 \quad (5-21)$$

avec $ACC_ENSE_i(t-1)$ l'accessibilité dont bénéficient les emplois de services administratifs dans la zone i à la population résidente à la période précédente.

$$ACC_ENSE_i(t-1) = \sum_j POP_j(t-1) \cdot \exp\left(-\frac{t_{ij}}{\tau_5}\right) \quad (5-22)$$

τ_5 calé à partir d'un modèle gravitaire de distribution des déplacements pour le motif correspond.

$POP_j(t-1)$ la population résidente en zone j à la période précédente,

$P_IMMO_i(t-1)$ sont les prix immobiliers dans la zone i à la période de temps précédente.

$DENS_EMP_i(t-1)$ la densité des emplois récréatifs dans la zone i à la période de temps précédente.

Tableau 5-12. Résultats de l'estimation de la répartition spatiale des emplois de l'enseignement

	R ²	0,67	R ² aj	0,63
variables	coefficient	erreur de Student	T ratio	Pr ob > t
Const	-0,3019	0,1819	-1,66	0,119
$\ln(ACC_LOIS_i)$	0,0387	0,0194	1,99	0,0597
$\ln(P_IMMO_i)$	-0,0137	0,0202	-0,68	0,5044
$\ln(DENS_EMP_i)$	0,0078	0,0077	1,00	0,3267

De la même façon que précédemment, seulement un quart de la répartition spatiale des emplois de l'enseignement est expliqué par cet ajustement.

335. La répartition spatiale des autres emplois induits

La répartition spatiale des autres emplois induits est spécifiée avec l'expression suivante :

$$P_{AUTR_i}(t-1) = a_2 ACC_AUTR_i(t-1) + b_2 P_IMMO_i(t-1) + \gamma_6 DENS_EMP_i(t-1) + \alpha_2 t_2 \quad (5-23)$$

avec $ACC_AUTR_i(t-1)$ l'accessibilité dont bénéficient les emplois de services administratifs dans la zone i à la population résidente à la période précédente.

$$ACC_AUTR_i(t-1) = \sum_j POP_j(t-1) \cdot \exp\left(-\frac{L_{ij}}{\tau_6}\right) \quad (5-24)$$

$POP_j(t-1)$ la population résidente en zone j à la période précédente,

τ_6 calé à partir d'un modèle gravitaire de distribution des déplacements pour le motif correspond.

$P_IMMO_i(t-1)$ sont les prix immobiliers dans la zone i à la période de temps précédente.

$DENS_EMP_i(t-1)$ la densité des autres emplois dans la zone i à la période précédente.

Tableau 5-13. Résultats de l'estimation de la répartition des autres emplois induits

	R ²	0,85	R ² aj	0,83
variables	coefficient	erreur de Student	T ratio	Pr ob > t
Const ₅	0,0001	0,000001	8,49	< ;,0001
ACC_AUTR _i	-0,0014	0,000103	-1,37	0,1861
P_IMMO _i	0,0000015	7,168.10 ⁻⁷	2,07	0,0508
DENS_EMP _i	0,00593	0,0111	0,53	0,5986

A l'instar de ce qui a été présenté précédemment, seulement un quart de la répartition spatiale des autres emplois induits est expliqué par la spécification retenue.

Section 4. Le module de déplacements

Le module de déplacements de personnes est le coeur du modèle. Le modèle de déplacement est conditionné à la fois par les paramètres d'occupation des sols dont l'évolution a été décrite précédemment et les conditions d'offre de transport. Il se présente sous forme séquentielle. Dans un premier temps, le taux de mobilité quotidien global ainsi que le nombre d'émissions et d'attractions par motif et par zone sont simulés. Ces déplacements sont spatialement distribués par motif entre les différentes zones formant l'aire urbaine. Pour chaque motif, les flux sont répartis entre les différents modes de transport. Enfin, ces flux sont affectés sur le réseau routier représenté par des capacités entre liaison zone à zone. Les conflits d'usage sur le réseau de surface sont pris en considération dans la mesure où les transports en commun de surface sont affectés par les dysfonctionnements de circulation sur le réseau routier. L'affectation se fait sous contraintes de capacités et tient compte des phénomènes de congestion. Le module de transport fournit d'une part des matrices de flux par motif et par mode, et d'autre part, des temps généralisés de déplacements par mode. Le module de transport est interactif. Plusieurs rétroactions sont mises en place. De façon générale, la modification des conditions de déplacement a des effets immédiats sur les choix d'itinéraires, des effets plus ou moins immédiats sur le choix du mode et des effets à moyen/long terme sur la distribution spatiale des déplacements. Le modèle de déplacement est calé sur une rétrospective de 20 ans (enquêtes ménage de déplacement de 1975, 1985 et 1995), ce qui lui confère une certaine robustesse quant aux relations sur lesquelles il s'appuie.

41. La mobilité et la génération des déplacements

Il y a deux facteurs qui interviennent dans l'évolution de la mobilité :

Le premier est le niveau de vie. On postule un lien étroit entre croissance du niveau de vie et croissance de la mobilité.

Le deuxième est la distribution des activités sur le territoire. Les pratiques de mobilité sont produites par la distribution des activités sur le territoire. Une part significative de la mobilité est contrainte et dépend des évolutions de la localisation des activités et des

résidents, de l'évolution des formes commerciales, *etc.*

Ces deux facteurs sont pris en compte dans le module de génération. Les déplacements, segmentés par motif, émis et reçus par zone sont estimés en fonction des générateurs de mobilité : le nombre d'actifs, le nombre d'emplois, *etc.* dont les évolutions sont simulées en amont dans les modèles d'occupation des sols. Pour chaque motif, une relation économétrique est établie entre le nombre de déplacements émis ou reçus et les quantités de générateurs de déplacements. Ces relations postulent un taux de mobilité constant dans le temps. L'évolution du taux de mobilité est alors appréhendée par sa relation avec l'évolution du revenu.

411. Les taux de génération zonaux

Le modèle prend en compte non pas des déplacements mais des chaînes de déplacements. Ce dernier concept apparaît en effet comme plus pertinent pour saisir les pratiques de déplacements des personnes. Les chaînes de déplacements permettent de repérer les pratiques de déplacements en évacuant les déplacements parasites secondaires contribuant à complexifier l'analyse. Les chaînes de déplacements ont été définies à partir de la zone de résidence en considérant le motif principal motivant le déplacement.

Les déplacements zonaux en émission et en attraction sont projetés à l'aide de modèles zonaux de régression linéaire. Dans ce cadre, une tentative est faite pour trouver une relation linéaire entre le nombre de déplacements produits ou attirés par une zone et les caractéristiques moyennes socio-économiques de chaque zone. Les régressions zonales pour la génération des déplacements sont usuellement estimées de façon séparée pour les différents motifs de déplacements. Ceci peut être formellement présenté comme suit :

$$T_i^m = \beta_0^m + \beta_1^m x_{1i} + \beta_2^m x_{2i} + \dots + \beta_k^m x_{ki} + \varepsilon^m \quad (5-25)$$

T_i^m : représente le nombre de déplacements générés à partir de la zone i pour le motif m ,

x_{ki} : représente la valeur de la $k^{\text{ième}}$ variable explicative pour la zone i ,

β_0^m : est la constante pour le motif m ,

β_k^m : est un coefficient représentant l'effet numérique sur la génération du trafic et résultant d'un accroissement unitaire de la variable x_{ki} .

Certaines considérations sont à prendre en compte :

Les modèles zonaux peuvent seulement expliquer les variations entre les comportements de déplacements entre les zones. Pour cette raison, ils peuvent seulement être pertinents si les variations inter-zonales reflètent adéquatement les raisons réelles de la variabilité des déplacements.

Le rôle de la constante dans la régression linéaire. Nous privilégions des spécifications sans constante dans la mesure où les résultats des régressions linéaires montrent que les constantes ne sont pas significativement différentes de zéro.

4111. Les émissions par motif

En ce qui concerne les déplacements émis à partir de la zone de résidence pour le motif travail, la variable explicative déterminante est le nombre d'actifs dans la zone d'émission. En effet, ce sont les personnes actives qui sont à l'origine de ce type de déplacements. Le taux de génération par actif est de 0,89. Le R^2 est de 0,98.

Pour les déplacements émis à partir de la zone de résidence pour le motif achats, services, loisirs, la variable explicative déterminante est la population totale dans la zone d'émission. En effet, toute personne est susceptible de réaliser ce type de déplacements. Les taux de génération sont respectivement égaux à 0,27 déplacements par personne pour les achats, 0,11 déplacements par personne pour les activités de services, 0,31 déplacements par personne pour les loisirs. Les R^2 sont respectivement de 0,86, 0,83 et de 0,89.

Les déplacements émis à partir de la zone de résidence pour le motif d'enseignement primaire ont comme variable explicative la population en âge d'être en enseignement primaire de la zone d'émission. Le taux de génération est de 1,25 déplacements par personne en âge d'être dans l'enseignement primaire. Le R^2 est de 0,91.

En ce qui concerne les déplacements émis à partir de la zone de résidence pour le motif d'enseignement secondaire, la variable explicative retenue est la population en âge d'être dans l'enseignement secondaire de la zone d'émission. Le taux de génération est de 1,15 déplacements par personne en âge d'être dans l'enseignement secondaire. Le R^2 est de 0,94.

Pour les déplacements émis à partir de la zone de résidence pour le motif de l'enseignement supérieur (universités, grandes écoles, BTS, IUT, ...), la variable explicative retenue est le nombre d'étudiants de la zone d'émission. Le taux de génération est de 0,90 déplacements par étudiant. Le R^2 est de 0,98.

Enfin, pour l'ensemble des déplacements restants (motif « reste »), c'est-à-dire les déplacements émis pour d'autres motifs et les déplacements secondaires (non liés au domicile), les variables retenues sont la population totale et le nombre d'emplois tertiaires de la zone d'émission. Le R^2 ajusté est de 0,95.

Ces résultats sont récapitulés dans le tableau suivant :

Tableau 5-14. Résultats des régressions linéaires des déplacements en émission par motif

Variable expliquée	variable explicative	R ²	Coef.	écart-type du coef.	rapport t
déplacements émis pour le motif <i>travail</i>	nombre d'actifs	0,98	0,89	0,0124	71,62
déplacements émis pour le motif <i>achat</i>	population totale	0,86	0,27	0,0125	21,77
déplacements émis pour le motif <i>services</i>	population totale	0,83	0,11	0,0059	19,08
déplacements émis pour le motif <i>loisir</i>	population totale	0,89	0,31	0,0132	23,56
déplacements émis pour le motif <i>enseignement primaire</i>	population en âge d'être en enseignement primaire	0,91	1,25	0,0386	32,48
déplacements émis pour le motif <i>enseignement secondaire</i>	population en âge d'être en enseignement secondaire	0,94	1,15	0,0296	38,82
déplacements émis pour le motif <i>enseignement supérieur</i>	nombre d'étudiants	0,98	0,90	0,0203	44,26
déplacements émis pour <i>d'autres motifs</i>	population totale emplois tertiaires	0,96	1,85 2,46	0,1288 0,364	14,36 3,35

4112. Les attractions par motif

En ce qui concerne les déplacements reçus pour le motif travail, la variable retenue est le nombre d'emplois offerts dans la zone de destination. Le taux de génération par emploi est de 0,78. Le R² est de 0,95.

Pour les déplacements reçus pour le motif achat, la variable retenue est le nombre d'emplois de commerce offerts dans la zone de destination. Nous avons préféré travailler avec le nombre d'emplois de commerce plutôt qu'avec le nombre d'établissements de commerce ou les surfaces d'établissements de commerce dans la mesure où c'est le

nombre d'emplois qui est modélisé dans le module d'occupation des sols intervenant en amont. Le taux de génération par emploi de commerce est de 5,58. Le R^2 est de 0,77.

Les déplacements reçus pour le motif services ont comme variable explicative le nombre d'emplois de services aux particuliers offerts dans la zone de destination. Le taux de génération est de 1,1 déplacements par emploi dans ces services. Le R^2 est de 0,89.

En ce qui concerne les déplacements reçus pour le motif des loisirs, la variable retenue est le nombre d'emplois dans les activités récréatives offerts dans la zone de destination. Le taux de génération est de 47,2 déplacements par emploi dans ces activités. Le R^2 est de 0,87.

Pour les déplacements reçus pour le motif de l'enseignement primaire, la variable retenue est la population en âge d'être dans l'enseignement primaire dans la zone de destination. La politique de l'enseignement primaire est une politique de proximité répondant aux besoins de la population. Ainsi, l'hypothèse de l'existence d'une forte adéquation entre le nombre de places offertes en école primaire et le nombre d'enfants en âge d'être dans l'enseignement primaire a été posée. Le taux de génération par personne en âge d'être en enseignement primaire est de 1,11. Le R^2 est de 0,90.

En ce qui concerne les déplacements reçus pour le motif de l'enseignement supérieur, la variable explicative est le nombre de places offertes dans les établissements de l'enseignement supérieur (Universités, grandes écoles, etc.). Le taux de génération par place offerte est de 0,45 déplacements. Le R^2 , relativement faible, est de 0,64.

Enfin, en ce qui concerne les déplacements reçus pour le motif « reste », les variables explicatives retenues sont la population totale et l'emploi tertiaire dans la zone de destination. Le R^2 ajusté est de 0,96.

Tableau 5-15. Résultats des régressions linéaires des déplacements en attraction par motif

Variable expliquée	variable explicative	R ²	Coef.	écart-type du coef.	Rapport t
déplacements reçus pour le motif <i>travail</i>	nombre total d'emplois	0,95	0,78	0,02	34,16
déplacements reçus pour le motif <i>achat</i>	nombre d'emplois de commerce	0,77	5,58	0,36	15,61
déplacements reçus pour le motif <i>services</i>	nombre d'emplois de services	0,89	1,10	0,06	18,96
déplacements reçus pour le motif <i>loisir</i>	nombre d'emplois dans les activités récréatives	0,87	47,23	2,36	20,04
déplacements reçus pour le motif <i>enseignement primaire</i>	population en âge d'être en enseignement primaire	0,89	1,25	0,04	28,41
déplacements reçus pour le motif <i>enseignement secondaire</i>	nombre de places en enseignement secondaire	0,90	1,11	0,05	23,24
déplacements reçus pour le motif <i>enseignement supérieur</i>	nombre de places dans les établissements supérieurs	0,64	0,45	0,06	8,13
déplacements reçus pour <i>d'autres motifs</i>	population totale emplois tertiaires	0,96	1,47 5,06	0,13 0,75	11,18 6,73

4113. La mise en cohérence des émissions et des attractions

Il n'y a aucune raison *a priori* pour que le total des émissions projetées soit égale au total des attractions projetées. Cependant les masses totales doivent vérifier cette contrainte. Une correction *a posteriori* doit donc être apportée. Les attractions par zone sont corrigées à partir du total des émissions (on multiplie chaque attraction projetée par le ratio entre le total des émissions et le total des attractions).

Le module de génération des déplacements en émission et en attraction projette des masses de déplacements en fonction de l'évolution des générateurs de déplacements. Le taux de génération est supposé être constant dans le temps ce qui équivaut à poser

l'hypothèse de la constance dans le temps du taux de mobilité quotidienne par personne. L'analyse des enquêtes-ménages de déplacements invalide fortement cette hypothèse. Ainsi, un module de mobilité doit être intégré afin de prendre en compte l'évolution de la mobilité quotidienne par personne.

412. L'évolution de la mobilité quotidienne : le rôle du revenu

Les déterminants du niveau global de la mobilité sont nombreux et variés. On peut mettre en évidence un grand nombre de relations liant la mobilité individuelle, à la taille du ménage auquel appartient l'individu, à la catégorie socio-professionnelle à laquelle il se rattache, à sa localisation dans l'agglomération, à son niveau d'instruction, à son niveau de motorisation. Nous nous situons dans une perspective de modélisation, nous avons pour double objectif de limiter le nombre d'entrées du modèle et de ne conserver que les variables les plus explicatives de la mobilité. En outre, dans le cadre d'un modèle de simulation, il convient de ne retenir que des variables de commande dont l'évolution peut être maîtrisée ou du moins sur lesquelles on peut poser des hypothèses scénariales d'évolution. Il faut noter que la plupart des variables citées sont fortement liées entre elles (revenus et niveau d'instruction, revenus et CSP, etc.). Les phénomènes de multi-colinéarité conduisent également à limiter le nombre de variables afin de ne pas comptabiliser plusieurs fois un même effet. A l'instar des travaux de Bouf (1989) et Tabourin (1989) sur les modèles QUINQUIN, nous avons retenu la variable « revenu » pour le lien étroit qu'elle entretient avec le niveau de la mobilité globale.

Les données des enquêtes ménages de 76 et de 95 nous permettent de caler cette relation³⁶. Nous faisons ici une utilisation diachronique de données synchroniques. Pour affecter une valeur aux paramètres définissant une dépendance entre deux caractères, il est nécessaire de disposer d'une série d'observations simultanées de ces deux caractères, toutes choses étant égales par ailleurs. Une détermination correcte de la fonction de dépendance requiert qu'une variance suffisante ait pu être observée. Il est alors difficile d'utiliser les séries chronologiques qui résultent bien souvent de l'action d'une multitude de facteurs dont il n'est guère possible d'isoler les effets. Pour contourner cette difficulté, on recourt souvent à un artifice qui consiste à exploiter des données obtenues par une coupe transversale de l'univers statistique envisagé et à supposer que les effets d'une variation dans le temps du facteur causal peuvent en être déduits. En d'autres termes, on estime que la variance synchronique du facteur causal rend compte d'une évolution diachronique (Bouf, 1989).

Nous postulons l'existence d'une relation entre la mobilité globale et le revenu des ménages. Cette relation est considérée au niveau de la mobilité tous modes, toutes zones confondues. Une tentative a été effectuée afin d'effectuer une distinction par grande zone géographique dans la mesure où des écarts entre les niveaux moyens de mobilité peuvent être observés (en 1995, centre = 4,55, banlieue = 4,66 et périphérie = 4,77). Cependant, la qualité des données ne nous a pas permis d'obtenir des régressions satisfaisantes.

A partir de l'enquête ménage de 1995, nous obtenons la spécification suivante :

³⁶ L'enquête ménage de 86 ne fournit pas de renseignements sur les revenus des ménages.

$$Mob = 0,4203 \times \ln(R) \quad (5-26)$$

avec

Mob : le niveau moyen de mobilité globale par personne,

R : le niveau moyen du revenu du ménage.

Tableau 5-16. Résultats de l'ajustement de la relation $Mob=f(R)$ selon l'enquête ménage de 1995

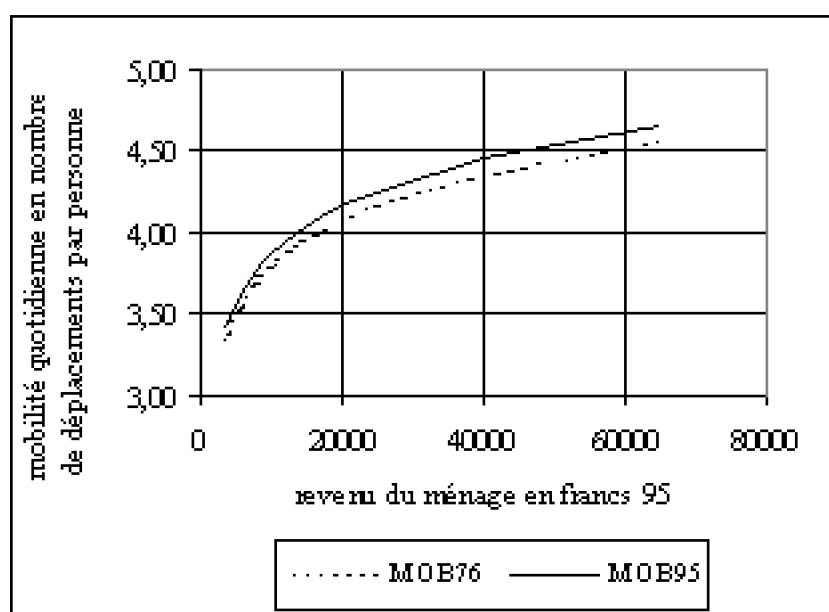
R^2	0,95
R^2 ajusté	0,95
coefficient	0,42
écart-type du coefficient	$0,29 \times 10^{-2}$
rapport t	143,23
$P[T > t]$	0,0000

Contrairement à la spécification adoptée dans les modèles QUINQUIN, nous avons choisi de ne pas conserver la constante de la régression. Ceci pour plusieurs raisons :

- * la première raison est que les résultats de l'ajustement faisaient apparaître que la constante n'est pas significativement différente de zéro,
- * la deuxième raison est qu'il n'y a pas d'explication économique qui justifie que l'on conserve la constante,
- * enfin, la troisième raison est que la spécification sans constante est plus cohérente avec la relation mobilité-revenu observée en 1976. En effet, dans ce cas, les courbes se superposent parfaitement, ce qui n'est pas le cas lorsque l'on conserve la constante.

Tableau 5-17. Résultats de l'ajustement de la relation $Mob=f(R)$ selon l'enquête ménage de 1976

R^2	0,86
R^2 ajusté	0,86
coefficient	0,41
écart-type du coefficient	$0,54 \times 10^{-2}$
rapport t	76,13
$P[T > t]$	0,0000



Graphique 5-1. Stabilité de la dépendance entre mobilité et revenu (régressions de 76 et de 95)

Les résultats de l'analyse économétrique entre mobilité et revenu montre la grande stabilité de cette relation. Les courbes représentatives de la relation estimée à partir de l'enquête ménage de 1976 et celle estimée à partir de l'enquête ménage de 1995 sont très proches. Ceci montre l'invariance de la relation entre mobilité globale et revenu. L'élasticité de la mobilité au revenu est une constante invariante dans le temps, elle s'établit à environ 0,11.

Cette relation permet d'estimer le nombre total de déplacements générés sans distinction de motif. La masse totale des déplacements de personnes s'obtient par la multiplication du coefficient de mobilité quotidienne par la population totale. Ce résultat n'est *a priori* pas cohérent avec la sommation des déplacements projetés par régressions linéaires dans la mesure où l'on considère des taux de génération constants dans le temps. Une adéquation doit donc être réalisée entre ces deux types de modules. L'analyse de la structure de l'évolution de la mobilité par motif à partir des enquêtes ménages met en évidence que ce sont les déplacements réalisés pour les services, les déplacements pour les loisirs et les autres déplacements qui absorbent le surplus de mobilité. La répartition du surplus de mobilité se réalise comme suit : 20% pour les déplacements réalisés pour les services ; 32% pour les déplacements de loisirs ; et 48% pour les autres déplacements.

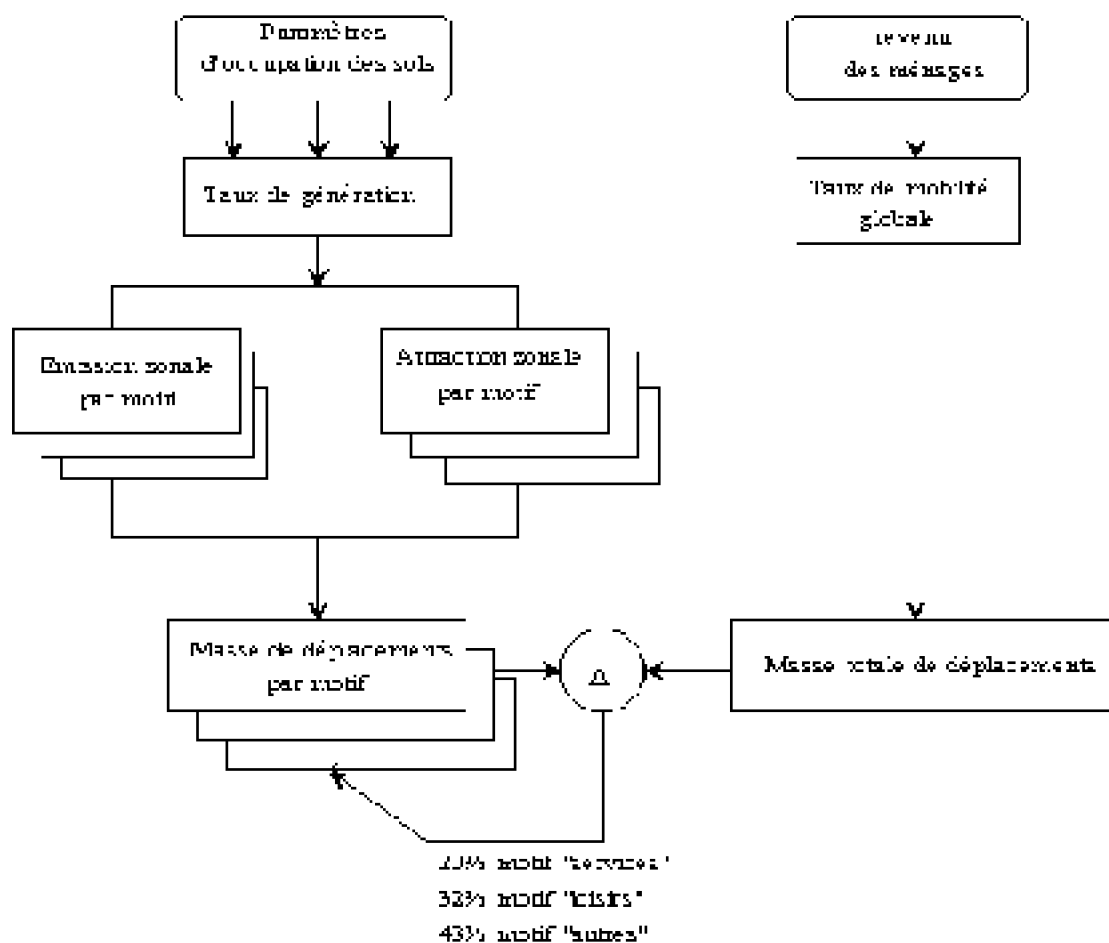


Figure 5-3. Structure schématique de la génération des déplacements

42. La distribution des déplacements par motif

Dans la section précédente, la méthode de la régression linéaire a permis d'estimer le nombre total de déplacements issus d'une zone donnée (émissions) et le nombre total de déplacements attirés dans une zone donnée (attractions). Les émissions et les attractions donnent une idée du niveau de déplacements effectués sur l'agglomération. Cette information, bien qu'utile, n'est pas suffisante. En effet, il est indispensable de connaître la structure spatiale des déplacements, pour notamment pouvoir estimer des volumes de trafic. C'est l'objet de l'étape de distribution des déplacements. La distribution des déplacements est réalisée par motif. De nombreux modèles ont été développés dans l'objectif de déterminer de quelle façon les déplacements quittant une zone donnée se répartissent entre chaque destination possible. Les plus courants de ces modèles sont les modèles gravitaires, les modèles des opportunités intermédiaires et les modèles d'entropie (cf. chapitre 2).

Etant donnée l'hétérogénéité des données de déplacements selon les périmètres retenus, nous avons été amenés à procéder de manière distincte pour la distribution des déplacements sur l'aire du périmètre de l'enquête ménage et sur le reste de l'aire d'étude.

Sur le périmètre de l'enquête ménage, la distribution des déplacements est réalisée, pour chaque motif, suivant une formulation gravitaire dont la spécification est la suivante :

$$T_{ij}^m = E_i^m \cdot A_j^m \cdot \exp(-t_{ij}^m / \tau_m) \cdot h_i^m \cdot k_j^m \quad (5-27)$$

T_{ij}^m : est le nombre de déplacements de la zone i à la zone j pour le motif m ,

E_i^m : est le nombre de déplacements émis par la zone i pour le motif m ,

A_j^m : est le nombre de déplacements attirés par la zone j pour le motif m ,

t_{ij}^m : est le temps généralisé multimodal pour aller de i à j ,

h_i^m et k_j^m sont les coefficients d'ajustement des marges pour le motif m ,

τ_m est le coefficient de distribution ou facteur de conductance pour le motif m .

Les coefficients d'ajustement des marges sont calculées par un algorithme bi-proportionnel proposé par Furness (Ortuzar, Willumsen, 1994). Cette méthode implique des corrections successives en lignes puis en colonnes de la matrice distribuée afin de satisfaire les contraintes aux marges, à savoir :

$$\sum_j T_{ij}^m = E_i^m \quad (5-28)$$

et

$$\sum_i T_{ij}^m = A_j^m \quad (5-29)$$

L'algorithme est arrêté lorsque les facteurs de correction sont suffisamment faibles et que les contraintes aux marges sont raisonnablement respectées.

Le calage du modèle est effectué par tâtonnement. Ce procédé vise à respecter le taux de déplacements intrazonaux d'une part, et à minimiser la somme des écarts au carré entre la matrice estimée et la matrice observée sans considérer les déplacements intrazonaux.

Les résultats de l'estimation à partir des données de l'enquête ménage 1995 sont les suivants :

Tableau 5-18. Résultats de l'estimation à partir des données de l'enquête ménage 1995

Motif	Facteur de conductance	Taux intrazonal
Résidence - Travail	9,625	31,0%
Résidence - Achat	4,75	65,6%
Résidence - Démarche	5,415	57,2%
Résidence - Loisirs	5,63	52,0%
Résidence - Enseignement Primaire	□	87,6%
Résidence - Enseignement Secondaire	4,91	57,8%
Résidence - Enseignement Supérieur	10,95	29,4%
Reste	3,76	81,1%

Les valeurs du coefficient de distribution ou coefficient de conductance sont très différentes selon le motif considéré. Ces coefficients nous renseignent sur la propension des individus à vouloir se déplacer plus loin ou plus longtemps. Une valeur élevée du coefficient signifie que les individus sont prêts à supporter des temps de déplacements plus longs pour se rendre à leur destination. Les déplacements pour le motif travail et pour le motif de l'enseignement supérieur sont les plus élevés (respectivement 9,625 et 10,95). En revanche, pour les motifs d'achat, de services, de loisirs, le paramètre de distribution présente des valeurs plus faibles (proches de 5) exprimant le fait que les individus sont moins enclin à se déplacer longtemps pour réaliser ce type d'activités. Par ailleurs, la distribution des déplacements pour le motif de l'enseignement primaire n'est pas réalisée selon la même spécification. En effet, 87,6% de ces déplacements se réalisent à l'intérieur des zones. Nous faisons alors l'hypothèse que ces flux sont exclusivement des flux intrazonaux.

Le facteur de conductance, qui exprime la plus ou moins grande résistance au temps de déplacement, ne peut pas être considéré comme constant au cours du temps. Nous savons que l'une des principales caractéristiques de l'évolution des déplacements est l'augmentation des distances parcourues. Le calage successif du modèle sur les trois enquêtes ménages permet de vérifier que le facteur de conductance augmente, selon les motifs, sensiblement avec le temps. Cela rend compte de l'aptitude des individus à maîtriser un espace aux fonctions de plus en plus éclatées sur des territoires plus vastes. Les individus acceptent d'aller plus loin et d'augmenter leur temps de parcours.

Tableau 5-19. Evolution des facteurs de conductance selon les calages successifs sur les trois enquêtes ménages (en minutes)

Motif	EM 76	EM 86	EM 95
Résidence - Travail	8,55	8,68	9,625
Résidence - Achat	3,78	4,05	4,75
Résidence - Services	3,27	4,48	5,415
Résidence - Loisirs	4,63	4,84	5,63
Résidence - Enseignement Primaire		□	□
Résidence - Enseignement Secondaire		4,50	4,91
Résidence - Enseignement Supérieur	40,43	10,69	10,95
Reste	3,46	3,61	3,76

L'augmentation de la propension à se déplacer plus longtemps peut être expliquée par la facilité de plus en plus grande de disposer d'une voiture particulière. L'évolution des facteurs de conductance est économétriquement bien expliquée par l'évolution des taux de motorisation. Les résultats des régressions linéaires entre taux de motorisation et facteur de conductance sont les suivants :

Tableau 5-20. Relation entre facteurs de conductance et taux de motorisation

Motif	Relation	R ²
Résidence - Travail	$\tau = 6,244 \text{ Motor} + 5,6423$	0,95
Résidence - Achat	$\tau = 5,4524 \text{ Motor} + 1,3036$	0,99
Résidence - Services	$\tau = 11,327 \text{ Motor} - 1,6152$	0,93
Résidence - Loisirs	$\tau = 5,7024 \text{ Motor} + 2,0111$	0,98
Résidence - Enseignement Supérieur	$\tau = 2,7857 \text{ Motor} + 9,2136$	0,96
Reste	$\tau = 1,6071 \text{ Motor} + 2,7582$	0,96

En ce qui concerne le motif Résidence - Enseignement Secondaire, les données de l'enquête ménage de 1976 ne distinguent pas le motif enseignement primaire et enseignement secondaire et donc ne permettent pas de caler le modèle de distribution. Par défaut, nous faisons l'hypothèse de la stabilité du facteur de conductance pour ce motif.

La distribution des déplacements n'est pas réalisée de la même façon sur l'aire externe de l'étude du fait de la non homogénéité des données de déplacements au delà du périmètre de l'enquête ménage. Nous rappelons en effet que sur ce périmètre, ne sont connus de façon exhaustive que les migrations alternantes. Les matrices de déplacements totaux doivent donc être reconstituées. Une hypothèse de travail est alors posée : les migrations alternantes structurent la répartition spatiale de l'ensemble des déplacements. La distribution des déplacements sur ce périmètre s'effectue alors sur la base de la répartition des migrations alternantes. La génération nous avait permis d'estimer les flux de migrations alternantes en émission et en attraction. Afin de modéliser la répartition spatiale des déplacements de personnes sur ce périmètre, deux stratégies

ont été retenues. Une première approche s'appuie sur l'outil classique d'analyse des interactions qu'est le modèle gravitaire. La seconde consiste à déterminer la structure des échanges par le biais des coefficients structurels (rapport des déplacements zone à zone observés à des déplacements théoriques correspondant à une indépendance entre origine et destination des déplacements).

Le modèle gravitaire

La spécification retenue par le modèle gravitaire est calquée sur celle qui a été appliquée sur le périmètre correspondant à l'enquête ménage, à savoir :

$$T_{ij} = E_i \cdot A_j \cdot \exp(-t_{ij} / \tau) \cdot h_i \cdot k_j \quad (5-30)$$

E_i sont les émissions de migrations alternantes quittant la zone i . Elles ont été estimées précédemment sur la base de régression linéaire en prenant comme variable explicative le nombre d'actifs dans la zone i .

A_j sont les migrations alternantes attirées dans la zone j , elles ont été également estimées précédemment sur la base de régression linéaire en prenant comme variable explicative le nombre d'emplois dans la zone j .

t_{ij} est le temps généralisé tous modes pour aller de i à j , calculé par le modèle d'affectation.

τ est le facteur de conductance.

h_i et k_j sont des facteurs de corrections des marges.

Le taux de migrations intrazonales est de 46,6%. Le calage estime un coefficient de conductance de 6,44 minutes. L'écart relatif moyen, calculé sur un découpage de l'aire en cinq couronnes, est de 3,3%. A partir des données des migrations alternantes du recensement général de la population de 1975, le calage de la formulation gravitaire estime un facteur de conductance de 5,34 minutes. Les données des migrations alternantes de 1982 ne permettent pas de reconstituer de manière exhaustive la matrice des migrations alternantes. Ainsi, il est difficile d'émettre des hypothèses vérifiables sur l'évolution du facteur de conductance. Nous considérons alors par défaut ce facteur constant.

La méthode des coefficients structurels

Dans une matrice OD, on entend par coefficient structurel relatif à la case ij ($i^{\text{ème}}$ ligne, $j^{\text{ème}}$ colonne), le rapport entre la valeur observée et la valeur théorique qui correspondrait à une situation d'indépendance entre zone d'origine et zone de destination. Cette valeur théorique se calcule simplement à partir des marges de la matrice.

T_{ij}^{obs} le nombre de déplacements observés entre la zone i et la zone j ,

et T_{ij}^{the} le nombre de déplacements théoriques entre la zone i et la zone j . Ces déplacements théoriques correspondent à une situation dans laquelle origines et destinations des flux seraient indépendantes. Ils se calculent à partir des marges de la matrice et s'écrivent :

$$T_{ij}^{the} = (T_{i.}^{obs} \cdot T_{.j}^{obs}) / T_{..}^{obs} \quad (5-31)$$

avec

$$T_{i.}^{obs} = \sum_j T_{ij}^{obs}, \quad T_{.j}^{obs} = \sum_i T_{ij}^{obs} \quad \text{et} \quad T_{..}^{obs} = \sum_{i,j} T_{ij}^{obs} = \sum_{i,j} T_{i.}^{obs} = \sum_{i,j} T_{.j}^{obs}$$

Le coefficient structurel CS_{ij} , défini par l'équation $T_{ij}^{obs} = CS_{ij} \cdot T_{ij}^{the}$ mesure alors l'écart entre la situation théorique d'indépendance des déplacements (T_{ij}^{the}) et la configuration observée ($T_{ij}^{obs} = CS_{ij} \cdot T_{ij}^{the}$). L'ensemble des CS_{ij} donne donc une image de la structure des déplacements.

Dans la mesure où les émissions et les attractions sont estimées dans la phase de génération, les flux théoriques peuvent être alors spécifiés comme suit :

$$T_{ij}^{the} = (E_i \cdot A_j) / T_{..} \quad (5-32)$$

E_i : les déplacements émis par la zone i ,

A_j : les déplacements reçus par la zone j ,

$T_{..}$: le total des déplacements sur l'aire considérée.

On en déduit que

$$T_{ij}^{obs} = CS_{ij} \cdot T_{ij}^{the}$$

$$T_{ij}^{obs} = \frac{CS_{ij} \cdot E_i \cdot A_j}{T_{..}}$$

Le calcul des coefficients structurels et des émissions et attractions, ainsi que le total des déplacements permet de reconstituer la matrice observée. Les coefficients structurels présentent des valeurs très différentes d'un couple (i,j) à l'autre. En particulier, les coefficients structurels concernant les migrations alternantes intrazonales sont tous supérieurs à l'unité et très élevés (variant entre 4,17 et 86,85), tandis que les coefficients structurels extrazonaux sont bien moins élevés (le maximum est à 2,5) et souvent ne dépassant pas l'unité. Nous avons essayé d'expliquer les coefficients structurels de façon statique (calage sur les observations de l'année 1990), d'une part en fonction des distances de zone à zone (distance réseau), et d'autre part en fonction des temps tous modes généralisés de zone à zone (calculés par le modèle d'affectation). Les résultats ne sont pas très satisfaisants. La distance explique environ 33% de la distribution des coefficients structurels : $CS_{ij} = 0,75 \ln(DIST_{ij}) + 2,82$ ($R^2=0,33$). Le temps explique environ 34% de la distribution des coefficients structurels ($CS_{ij} = -1,01 \ln(Tps_{ij}) + 4,26$ avec $R^2=0,34$).

La relation établie à partir des coefficients structurels peut être utilisée comme base de projection de la demande de déplacements. Il convient alors de projeter dans le temps d'une part les coefficients structurels et d'autre part, les émissions et les attractions de déplacements par zone. Du fait de manque de données disponibles, nous faisons l'hypothèse de l'invariance des coefficients structurels, ce qui revient à poser l'hypothèse que la structure spatiale des déplacements est constante dans le temps. Cependant, les données disponibles sur les migrations alternantes ne permettent pas de vérifier cette hypothèse. En effet, nous ne disposons, de façon exhaustive, que de la matrice des migrations alternantes du recensement de 1975, les données pour 1982 étant incomplètes. A partir de la projection des émissions et des attractions, on reconstitue la matrice origine-destination en appliquant les coefficients structurels. Ainsi :

$$T_{ij}^t = \frac{CS_{ij}^{réf} \cdot E_i^t \cdot A_j^t}{T_{..}^t} \quad (5-33)$$

Chacune des deux méthodes présentent des avantages et des inconvénients. La méthode des coefficients structurels présente l'avantage de restituer à l'identique la matrice des migrations alternantes en situation de référence. En revanche, aucune variable de commande n'est introduite dans ce modèle, les coefficients structurels étant supposés constants et non expliqués. La matrice ne peut donc se déformer que sous l'effet des modifications de la structure des marges. La méthode gravitaire présente l'inconvénient de ne pas restituer à l'identique la matrice des migrations alternantes pour l'année de base. Elle permet cependant d'introduire une sensibilité de la répartition spatiale des migrations alternantes au temps. Nous avons choisi de conserver l'approche des coefficients structurels afin de limiter la déformation de la matrice des déplacements.

A l'issue de cette étape, nous obtenons la matrice des flux pour le motif domicile-travail tous modes confondus. Il convient alors de retrancher à cette matrice les flux effectués par voie ferrée. Cette opération est faite sur la base de l'estimation des flux effectués par train pour le motif domicile-travail (enquête SCNF 1994-1995). Les parts de

marché relatives à la voiture particulière et au mode ferré ne sont pas modélisées. Par défaut, la structure modale de l'année de référence est conservée.

A la suite de cette opération, nous disposons d'une matrice origine-destination en voiture particulière pour le motif domicile-travail. A partir de cette matrice, nous reconstruisons la matrice des déplacements en voiture particulière tous motifs. Le redressement de la matrice domicile-travail à la matrice tous motifs a été réalisé à partir des données d'enquêtes cordon qui fournit la structure des déplacements par motif. La part du motif domicile-travail dans ces flux représente environ 68% des déplacements. Ensuite, les déplacements de personne sont transformés en déplacements de véhicule particulier par le biais d'un coefficient d'occupation moyen des véhicules de 1,2 personnes par véhicule. Enfin, les déplacements en u.v.p à la journée sont transformés en déplacement à l'heure de pointe du matin. La part des déplacements effectués en heure de pointe du matin est de 11%.

Ainsi, pour les déplacements réalisés à l'extérieur de l'enquête ménage, les déplacements ne sont pas générés et distribués par motif mais à partir de la structure des migrations alternantes. L'ensemble de la matrice de déplacement est reconstruite par la suite. Pour ces déplacements, la répartition modale n'est pas modélisée, ce sont uniquement des proportions fixes des déplacements réalisés en transport collectif qui sont considérées.

43. La répartition modale par motif

Une fois que le nombre de déplacements partant de chaque origine et se dirigeant vers chaque destination pour un motif particulier a été estimé, une étape essentielle dans un modèle de transport urbain est d'estimer le nombre de déplacements pour chacun des différents modes de transport. La modélisation de la répartition modale n'est réalisée que sur le périmètre restreint de l'étude, à savoir celui de l'enquête ménage.

431. Considérations générales

Bovy (1999) rappelle qu'en général, les villes européennes ont ou ont eu des politiques visant à provoquer une utilisation intensive des transports en commun pour tenter d'enrayer la croissance soutenue de l'usage de l'automobile. De lourds investissements d'infrastructures et subsides d'exploitation sont consentis pour accroître la part de marché des transports publics. Ces politiques de développement de l'offre de transports publics sont souvent décevantes en termes de report modal. Un accroissement du nombre d'usagers des transports collectifs est constaté, mais sans diminution concomitante du trafic automobile. Le report modal s'effectue au détriment des mobilités douces, la marche à pied et les deux roues, ce qui n'est pas l'objectif poursuivi. Les expériences montrent que des améliorations substantielles de l'offre en transports collectifs ne suffisent pas, à elles seules, à entraîner une réduction de la mobilité automobile.

L'étude des pratiques modales indique que la réponse des usagers potentiels face au choix modal est très hétérogène et dépend de facteurs sociologiques souvent très éloignés des caractéristiques généralement prises en compte dans les études et modélisation du choix modal. Le stationnement est une variable importante dans les

comportements de report modal. Ainsi, la disponibilité ou non d'une place de stationnement au lieu de travail peut être un déterminant beaucoup plus significatif du choix modal des pendulaires que la qualité de l'offre de transport public. Les facteurs qui influencent le choix du mode peuvent être classifiées en trois groupes : les caractéristiques relatives à la personne qui se déplace, les caractéristiques liées au type de déplacement, et les caractéristiques relatives à l'offre de transport. De nombreuses variables sont susceptibles d'expliquer la structure du partage modal. Cependant, un bon modèle de répartition modal, dans le cadre d'un modèle de simulation, ne doit pas seulement sélectionner les variables les plus significatives mais surtout retenir celles qui sont susceptibles de refléter une mesure de politique de transport.

Les variables socio-économiques les plus couramment utilisées pour expliquer le comportement de choix du mode sont les suivantes.

• *Le revenu*, de par notamment sa relation à la valeur accordée au temps,

• *L'âge et la structure du ménage*. Les personnes les plus jeunes et les plus âgées sont moins susceptibles de conduire et donc sont davantage captives des transports collectifs. Le chef de ménage peut avoir un comportement de choix du mode différent du reste des autres membres de la famille. Dans une famille monomotorisée, le chef de ménage est davantage enclin à utiliser la voiture pour ses déplacements pour le travail, laissant les autres membres du ménage captifs des transports publics. Pour des familles nombreuses, particulièrement avec de jeunes enfants, cette tendance peut être renversée.

• *La motorisation et la possession du permis de conduire*. Le nombre d'automobiles disponibles dans un ménage a souvent été avancé pour expliquer le comportement de choix modal. De façon évidente, plus il y a d'automobiles disponibles et moins les membres du ménage sont susceptibles d'utiliser les transports collectifs. Notons que la décision d'acquisition d'une automobile et celle du choix modal sont corrélées et simultanées mais rarement considérées comme telles dans les modèles.

• *La localisation résidentielle*. Certains modèles de choix modal ont introduit des variables décrivant la localisation résidentielle du ménage comme déterminant du choix modal. Les ménages résidant dans la partie centrale de la ville sont davantage susceptibles d'emprunter les transports publics que les ménages habitant en périphérie. Il est cependant possible d'obtenir une meilleure résolution sur l'effet de ce facteur en considérant les caractéristiques d'offre plutôt que la simple localisation résidentielle, car ceci traduit clairement un effet réseau. Dans les aires centrales de la ville, l'accessibilité aux transports publics est meilleure que dans les parties périphériques.

Par ailleurs, le choix du mode est fortement influencé par les caractéristiques liées au type de déplacement, comme le motif du déplacement ou l'heure du déplacement. Enfin, le choix du mode est conditionné par des caractéristiques de l'offre de transport. Elles

peuvent être divisées en deux catégories. Premièrement, les facteurs quantitatifs tels que : les temps de déplacements relatifs au temps passé dans le véhicule, au temps d'attente et de marche à pied pour chacun des modes ; les coûts monétaires (coûts tarifaires et coûts kilométriques) ; la disponibilité d'une place de stationnement et le coût du stationnement. Deuxièmement, les facteurs qualitatifs qui sont plus difficilement mesurables tels que : le confort et l'agrément ; la fiabilité et la régularité ; la protection et la sécurité.

Dans notre modèle, le partage modal se réalise en deux temps. Une première étape consiste à répartir ces déplacements (exprimés par motif et de zone à zone) entre ceux qui s'effectuent en modes légers et ceux qui s'effectuent en modes motorisés (voiture particulière et transports collectifs). Les modes légers sont essentiellement des modes de proximité : les deux roues mais surtout la marche à pied. La deuxième étape consiste en la répartition des déplacements motorisés entre voiture particulière et transports collectifs.

432. La répartition des déplacements entre les modes légers et les autres modes

Génération et distribution se faisant tous modes confondus, il convient d'isoler les déplacements en modes légers avant de procéder au partage entre voiture particulière et transports collectifs. Selon l'enquête ménage de 1995, les modes légers représentent 35% des déplacements réalisés. Une modélisation fine de ces déplacements de proximité n'est évidemment pas du ressort d'un modèle macroscopique. On cherche donc uniquement à en estimer le volume approximatif.

Ces déplacements se font presque exclusivement à l'intérieur des zones du découpage en 25 zones. Leur part est toutefois très variable selon la zone : majoritaire dans les zones centrales de l'agglomération, ils deviennent très minoritaires au fur et à mesure que l'on s'en éloigne. Par ailleurs, 87% des déplacements en modes légers se réalisent en intrazone. Le reste de ces déplacements étant des déplacements de proximité. On choisit donc de négliger la part de ces modes pour les déplacements extrazonaux. Le tableau suivant montre la part des déplacements réalisés en modes légers par motif selon les trois enquêtes ménages.

Tableau 5-21. Parts des déplacements réalisés en modes légers par motif

Motif	1976	1986	1995
Résidence - Travail	33 %	18 %	15 %
Résidence - Achat	70 %	54 %	47 %
Résidence - Services	39 %	40%	43 %
Résidence - Loisir	64 %	43 %	42 %
Résidence - Enseignement primaire	81%	59 %	64 %
Résidence - Enseignement secondaire		48 %	42 %
Résidence - Enseignement supérieur	80%	19 %	28 %
Autres motifs	55 %	34 %	33 %
Total	53 %	36 %	35 %

Il existe peu de modèles dans la littérature qui traitent spécifiquement du choix des modes légers. Le premier élément caractéristique de ce mode est qu'il ne peut pas être décrit en termes de variables d'offre. Les modes légers sont des modes de proximité, la proportion de déplacements effectués en modes légers dans une zone dépend fortement des caractéristiques de la structure urbaine. Une des caractéristiques significatives des structures urbaines est la densité exprimée en nombre d'habitants et d'emplois rapporté à la surface urbaine. Les modes légers trouvent leur pertinence sur des distances courtes. Ils sont donc davantage présents dans les zones urbaines denses, où les distances à parcourir sont raisonnables. Par ailleurs, quand le choix est possible, la concurrence est forte entre les modes légers et la voiture particulière. Le taux de motorisation de la zone est donc une variable à considérer.

Selon des ajustements par régressions linéaires simples sur les données de l'enquête ménage 1995 pour les déplacements tous motifs confondus, le logarithme népérien de la densité explique 70% de la distribution des parts des déplacements en modes légers. Le logarithme népérien de la surface explique environ 63% de cette distribution et enfin l'exponentielle négative du taux de motorisation explique 75% de la distribution des déplacements réalisés en modes légers en intrazonaux. Par ailleurs, la part des modes légers est une fonction croissante de la densité. Plus la densité s'élève, plus les lieux d'activités se rapprochent et plus ce mode de déplacement est efficace. La part des modes légers est une fonction décroissante de la surface. Plus la surface de la zone est élevée, plus les distances à parcourir sont élevées et moins les modes légers sont adaptés. Toutefois, nous pensons que cette variable est un artefact du modèle dans la mesure où elle est très liée au découpage adopté. Enfin, la part des modes légers est une fonction décroissante du taux de motorisation.

Au total, l'analyse de ces déplacements conduit à décomposer ce choix en plusieurs déterminants principaux :

Pour se déplacer en mode léger, il convient tout d'abord que la distance à parcourir ne soit pas trop importante ; la part de déplacement est fonction du logarithme népérien de

la densité ;

Les modes légers sont moins sollicités lorsque une automobile est disponible. La part des déplacements en modes légers est fonction de l'exponentielle négative du taux de motorisation.

Enfin, les modes légers peuvent être attractifs indépendamment des conditions de distance et de captivité.

La formulation retenue est la suivante :

$$P_{MLi}^m = a * [\ln(\sqrt{DENS_i}) / 10] \times [\exp(-b.motor_i) + c] \quad (5-34)$$

avec

P_{MLi}^m , la proportion de déplacements effectués en modes légers dans la zone i , pour le motif m .

$DENS_i$, la densité de population dans la zone i .

$motor_i$, le taux de motorisation dans la zone i .

a , b et c les paramètres à estimer.

Tableau 5-22. Résultats du calage du module d'estimation des proportions de déplacements réalisés en modes légers

Motif	a	b	c
Résidence - Travail	1,98	1,79	0,16
Résidence - Achat	2,05	1,64	0,37
Résidence - Services	1,30	1,44	0,50
Résidence - Loisir	2,23	1,73	0,33
Résidence - Enseignement primaire	2,17	1,72	0,34
Résidence - Enseignement secondaire	2,19	1,87	0,35
Résidence - Enseignement supérieur	1,93	1,51	0,20
Autres motifs	1,93	1,91	0,11

Le calage est effectué sur les données des trois enquêtes ménages par le solveur

d'EXCEL visant à la maximisation de la somme des écarts au carré entre les valeurs estimées et les valeurs observées. Les motifs pour lesquels le paramètre a est élevé (les motifs scolaires et les motifs récréatifs) sont les moins sensibles à la distance. Une forte valeur de b correspond à un motif peu influencé par la motorisation. Ici les valeurs de b sont peu différenciées. Enfin, le paramètre c mesure l'attractivité des modes légers indépendamment des conditions de distance et de captivité.

433. La répartition des déplacements entre voiture particulière et transports collectifs

Après avoir isolé les déplacements réalisés en modes légers, il convient de modéliser de quelle façon s'effectue la répartition des déplacements entre la voiture particulière et les transports collectifs. La littérature sur le choix modal est très abondante.

L'observation de la répartition modale s'effectue pour chaque origine-destination et pour chaque motif sur la base du nombre de déplacements réalisés avec chacun des modes. Le fait que les déplacements soient segmentés en motif permet implicitement d'introduire une variable explicative des comportement de choix du mode. En effet, selon le motif, la répartition des déplacements entre voiture particulière et transports collectifs est très différente.

4331. La répartition modale des déplacements pour les motifs enseignement primaire et enseignement secondaire

Pour les déplacements qui se réalisent pour l'enseignement primaire, la part des transports collectifs est très faible, autour de 9% en 1995. Ceci s'explique par le facteur âge. Les enfants sont trop jeunes pour emprunter les transports collectifs. Ces déplacements se caractérisent alors par des pratiques d'accompagnement en voiture particulière. En revanche, les déplacements réalisés pour le motif de l'enseignement secondaire sont fortement caractérisés par l'usage des modes collectifs. La part des transports collectifs est de 67% en 1995.

La modélisation de la répartition modale des déplacements pour ces deux motifs est délicate pour plusieurs raisons :

* Les individus concernés par ces déplacements ne sont pas en situation de choix dans la mesure où ils sont trop jeunes pour conduire ou être en possession du permis de conduire. Ils ne sont donc pas en situation d'arbitrage entre les transports collectifs et la voiture particulière. Il s'agit d'une population captive (que ce soit des pratiques d'accompagnement dans le cas des déplacements pour le motif de l'enseignement primaire ou des transports collectifs dans le cas de l'enseignement secondaire).

* Par ailleurs, pour ces motifs, les déterminants du choix VP/TC ne peuvent être trouvés dans la description de l'offre telle qu'elle est faite dans le modèle. Celle-ci n'est en effet pas assez représentative ni de l'offre de transport sur de courtes distances (intrazonales notamment), ni de l'offre en transports collectifs spécifiquement scolaire.

* Enfin, les données disponibles par les enquêtes ménages ne sont pas suffisamment représentatives afin d'observer les tendances de répartition modale zone à zone pour ces motifs considérés.

Le choix a été fait de considérer comme fixée la répartition modale pour le motif de l'enseignement primaire et de l'enseignement secondaire. En ce qui concerne l'enseignement primaire, on ne considère que les déplacements intrazonaux, dans la suite logique de ce qui a été fait pour la distribution. La part modale pour les transports collectifs est uniformément fixée à son niveau de 1995, soit 9%. En ce qui concerne les déplacements pour l'enseignement secondaire, nous ne considérons pas un taux uniforme mais des taux par grandes liaisons urbaines afin de tenir compte de la différenciation des pratiques de mobilité selon la structure urbaine (effet densité) et de l'accessibilité à l'offre en transports collectifs. La structure spatiale de la répartition modale TC/VP en 1995 est la suivante.

Tableau 5-23. Structure spatiale de la répartition modale TC/VP pour le motif de l'enseignement secondaire

% TC en 1995	Centre	Banlieue	Périphérie
Centre	69%	60%	76%
Banlieue	76%	74%	57%
Périphérie	64%	63%	52%

Pour les autres motifs, nous pouvons poser l'hypothèse qu'il existe un véritable arbitrage entre la voiture particulière et les transports collectifs. Les comportements de choix modal sont différents selon les motifs. Selon l'enquête 1995, la part des déplacements réalisés en transports collectifs pour le motif résidence-travail est de 16%, celle pour le motif résidence-achat est de 15%, celle pour le motif résidence-services est de 23%, celle pour le motif résidence-enseignement supérieur est de 62%.

Le tableau suivant présente l'évolution des parts modales TC/VP pour chaque motif considéré.

Tableau 5-24. Parts de marché des transports collectifs par motif selon les enquêtes ménages de 1976, 1985 et 1995

Motif	%TC 76	%TC 85	%TC 95
Résidence-Travail	28%	22%	16%
Résidence-Achat	19%	16%	15%
Résidence-Services	26%	35%	23%
Résidence-Loisirs	16%	28%	24%
Résidence-Enseignement supérieur	66%	61%	62%

4332. La répartition des déplacements entre voiture particulière et transports

collectifs pour le motif travail, le motif achat, le motif services, et le motif « autres motifs »

La part modale en transports collectifs est estimée pour chaque motif à partir d'une spécification logistique. Plusieurs spécifications sont testées. L'analyse préalable des enquêtes ménages a permis de dégager que hormis le rôle des temps de parcours dans la répartition modale, d'autres facteurs entraient en considération. En effet, les parts de marché en transport collectifs sont plus élevées dans les parties centrales de l'agglomération et sur les liaisons radiales entre la première couronne et le centre. Ceci s'explique par le fait que ce sont des zones où les transports collectifs sont les plus compétitifs (présence de métro, lignes de bus nombreuses et bien cadencées). Les conditions de leur compétitivité sont en effet réunies : une forte densité des résidents et des emplois permettant une bonne massification des flux. *A contrario*, sur les liaisons périphériques, la qualité de desserte en transports collectifs est moindre, et les individus sont davantage enclin à utiliser leur automobile s'ils sont motorisés (l'usage de la voiture particulière étant dissuadé dans les parties centrales de l'agglomération du fait des conditions de circulation et surtout des difficultés de stationnement). Ainsi, il apparaît que la densité urbaine et le taux de motorisation sont des déterminants importants de la répartition modale.

Les observations se font au niveau agrégé. Nous cherchons à estimer la proportion de déplacements effectués en transports collectifs pour chaque O-D. Cette proportion estimée est reliée à différentes variables explicatives. Nous estimons le partage modal entre voiture particulière et transports collectifs avec le logiciel LIMDEP. Ce logiciel estime la spécification suivante du modèle logit binomial :

$$Prob[y_i = 1] = \frac{e^{\beta'x}}{1 + e^{\beta'x}} \quad (5-35)$$

Le choix s'effectue entre deux alternatives 0 et 1. La fonction d'utilité dérivée $U_0 = \beta'_0 x + \varepsilon_0$ pour le choix 0, et $U_1 = \beta'_1 x + \varepsilon_1$ pour le choix 1 ; dans lesquels ε_0 et ε_1 sont les composantes de l'utilité qui ne peuvent pas être mesurées. Le choix de l'alternative 1 révèle que $U_1 > U_0$ ou que $\varepsilon_0 - \varepsilon_1 \leq \beta'_0 x - \beta'_1 x$,

$$\beta'_1 x = \beta'_0 x - \beta'_1 x.$$

Un ensemble de combinaison de variables explicatives a été testé. Dans l'ensemble, les résultats de l'ajustement ne sont pas très satisfaisants. La spécification la plus acceptable est la suivante :

$$PROPTC_{ij} = \frac{\exp(-a \cdot COMPTG_{ij} - b \cdot MOTOR_{ij} + c \cdot \ln(DENS_{ij}))}{1 + \exp(-a \cdot COMPTG_{ij} - b \cdot MOTOR_{ij} - c \cdot \ln(DENS_{ij}))} \quad (5-36)$$

avec

$PROPTC_{ij}$ est la proportion de déplacements effectués en transports collectifs sur l'O-D ij ,

$COMBTG_{ij}$ est la différence des temps généralisés TC et VP entre i et j pondérée par la somme de ces temps généralisés,

$MOTOR_i$ est le taux de motorisation de la zone i ,

$LN(DENS_j)$ est le logarithme de la densité de la population et des emplois de la zone j .

Ainsi l'équation présente une variable de comparaison des temps généralisés pour les deux modes ($COMBTG_{ij}$), une variable socio-économique qui est le taux de motorisation de la zone d'origine du déplacement ($MOTOR_i$) et une variable d'urbanisation, qui est la densité urbaine dans la zone de destination ($DENS_j$).

Les résultats des estimations de la proportion de déplacements réalisés en transports collectifs pour chacun des motifs considérés sont exposés dans les tableaux suivants. Ces résultats présentent des coefficients de détermination assez faibles. Les signes des coefficients sont logiques. En effet :

La part des transports collectifs diminue lorsque la variable $COMBTG_{ij}$ augmente,

La part des transports collectifs augmente lorsque la variable $LN(DENS_j)$ augmente. Une densité urbaine élevée dans la zone de destination encourage l'usage des transports collectifs du fait d'un réseau fortement maillé et décourage l'usage de la voiture particulière du fait des difficultés de stationnement.

Enfin, la part des transports collectifs diminue lorsque la variable $MOTOR_i$ augmente. Un fort taux de motorisation dans la zone d'origine encourage en effet l'usage de la voiture particulière, au détriment des transports collectifs.

Etant donné la qualité médiocre de l'estimation, des coefficients correcteurs sont alors appliqués. Ces coefficients sont spatialisés sur la base du macro-découpage suivant : centre, première couronne est, première couronne ouest, périphérie.

Tableau 5-25. Résultats de l'estimation du modèle de répartition modale VP/TC pour le motif résidence - travail

Fonction log de vraisemblance -77,04				
Fonction de vraisemblance restreinte -95,77				
Chi² 37,46				
variable	coefficient	écart-type du coefficient	Rapport t	P[Z > ;z]
COMBTG _{ij}	-0,7381	1,3112	-0,563	0,1570
MOTOR _i	-3,2170	2,1848	-1,472	0,6173
LN(DENS _j)	0,1199	0,1354	0,886	8,994

Tableau 5-26. Résultats de l'estimation du modèle de répartition modale VP/TC pour le motif résidence - achat

Fonction log de vraisemblance -39,57				
Fonction de vraisemblance restreinte -51,99				
Chi² 24,84				
variable	coefficient	écart-type du coefficient	Rapport t	P[Z > ;z]
COMBTG _{ij}	-3,3850	2,3365	-1,449	0,1474
MOTOR _i	0,1997	0,1875	1,066	0,2866
LN(DENS _j)	-3,1237	3,3103	-0,944	0,3454

Tableau 5-27. Résultats de l'estimation du modèle de répartition modale VP/TC pour le motif résidence - services³⁷

Fonction log de vraisemblance -43,17				
Fonction de vraisemblance restreinte -50,64				
Chi² 14,94				
variable	coefficient	écart-type du coefficient	Rapport t	P[Z > ;z]
COMBTG _{ij}	0,4699	1,5328	-0,307	0,7592
MOTOR _i	0,1595	0,1583	1,007	0,3137
LN(DENS _j)	-3,332	2,4952	-1,335	0,1818

Tableau 5-28. Résultats de l'estimation du modèle de répartition modale VP/TC pour le motif résidence - loisir

³⁷ Le coefficient de la variable n'est pas significativement différent de zéro, cependant nous conservons cette variable. Les signes des coefficients sont logiques au regard de la variable expliquée. Des coefficients de correction sont également adoptés.

Fonction log de vraisemblance -55,81				
Fonction de vraisemblance restreinte -65,45				
Chi² 19,29				
variable	coefficient	écart-type du coefficient	Rapport t	P[Z > ;z]
COMBTG _{ij}	-1,3565	1,2708	-1,067	0,2858
MOTOR _i	-2,8386	2,3249	-1,221	0,2221
LN(DENS _j)	0,1451	0,1463	0,992	0,3214

Tableau 5-29. Résultats de l'estimation du modèle de répartition modale VP/TC pour les autres motifs

Fonction log de vraisemblance -118,92				
Fonction de vraisemblance restreinte -153,40				
Chi² 68,98				
variable	coefficient	écart-type du coefficient	Rapport t	P[Z > ;z]
COMBTG _{ij}	-1,3030	1,0080	-1,293	0,1961
MOTOR _i	-2,3352	1,4995	-1,57	0,1194
LN(DENS _j)	0,0564	0,0982	0,574	0,5659

4333. La répartition des déplacements entre voiture particulière et transports collectifs pour le motif enseignement supérieur

La spécification adoptée pour les précédents motifs n'est pas cohérente et pertinente pour le motif résidence - enseignement supérieur. En effet, les signes des coefficients ne sont pas logiques au regard de la variable expliquée et non significativement différents de zéro. Pour ce motif, la part de marché des transports collectifs est élevée, elle s'élève à 62% pour l'ensemble de l'aire urbaine. Les étudiants sont ainsi davantage enclin à emprunter les transports collectifs. Il s'agit en effet d'une clientèle privilégiée des transports collectifs. On peut considérer qu'ils sont relativement captifs des transports collectifs, étant moins motorisés que le reste de la population. D'autre part, les sites universitaires et les grandes écoles sont relativement bien desservis par les réseaux de transports collectifs. Les spécifications précédentes du partage modal étaient établies d'une part sur la concurrence VP/TC, représentée par la différence des temps généralisés VP et TC, et d'autre part par des variables représentant des contraintes ou *a contrario* des opportunités à l'usage de la voiture particulière. Dans la mesure où nous faisons l'hypothèse que les étudiants sont une population relativement captive des transports collectifs, cette spécification ne peut pas être adaptée à la représentation du partage modal voiture particulière/transports collectifs pour le motif de l'enseignement supérieur. La concurrence VP/TC se révélant non pertinente pour ce motif.

Par défaut, nous faisons alors l'hypothèse de la conservation des parts de marché de la voiture particulière observée pour l'année 1995 selon un découpage en trois zones (Centre, Banlieue, Périphérie).

Tableau 5-30. Parts de marché des déplacements en transports collectifs pour le motif enseignement - supérieur

% TC en 1995	Centre	Banlieue	Périphérie
Centre	74%	78%	0%
Banlieue	49%	59%	9%
Périphérie	44%	33%	0%

4334. Comparaison de la répartition des déplacements entre voiture particulière et transports collectifs

Une comparaison des résultats de l'estimation du modèle de répartition modale peut être menée. Les résultats sont récapitulés dans le tableau suivant :

Tableau 5-31. Récapitulatif des paramètres d'estimation des modèles logit binaire selon les motifs de déplacements

	a (COMBTG)	b (LDENS)	c (MOTOR)
résidence - travail	-0,74	0,12	-3,22
résidence - achat	-3,38	0,19	-3,12
résidence - service	-0,47	0,16	-3,33
résidence - loisir	-1,36	0,14	-2,84
résidence - autres	-1,30	0,06	-2,33

La variable qui semble avoir le plus de poids est le taux de motorisation de la zone d'origine. Les valeurs sont d'ailleurs relativement proches d'un motif à l'autre. La sensibilité à la différence des temps pondérée ($COMBTG_{ij}$) n'est pas la même selon le motif envisagé. En effet, elle est plus sensible pour le motif achat, puis pour le motif loisir. Cela signifie que les individus sont plus sensibles à la compétition modale TC/VP pour ces motifs et que le facteur temps est un facteur important pour le choix du mode. La sensibilité à la variable de densité est relativement homogène, excepté pour les « autres motifs ». On remarque cependant que le partage modal est davantage sensible à la variable densité pour le motif « achat ». Ainsi, une forte densité urbaine de la zone de destination inciterait davantage les pratiques de déplacements en transports collectifs que pour les autres motifs. Enfin, la sensibilité à la variable motorisation est relativement homogène pour les motifs travail, achat et service. Les motifs de loisir et les autres motifs sont moins sensibles à cette variable.

Au total, l'estimation de la part des déplacements en transports collectifs n'est cependant pas très satisfaisante du point de vue économétrique. Une des raisons est l'inadaptation de la donnée à la modélisation des comportements individuels. Cependant, les résultats peuvent tout de même permettre la simulation de modification des parts de marché des transports collectifs du fait de la modification des conditions de transport et de la configuration urbaine. Ces simulations feront l'objet du dernier chapitre.

44. La procédure d'affectation des déplacements

Après avoir modélisé la phase de génération, la phase de distribution spatiale, la phase de répartition modale, une dernière étape du processus de déplacement doit être modélisée : la phase d'affectation. Cette étape vise à affecter les déplacements orientés sur un réseau simplifié. Ceci permet de représenter la confrontation entre la demande de déplacement et l'offre physique de transport. Après avoir présenté les grands principes des procédures d'affectation, la méthode d'affectation adoptée dans le modèle sera exposée.

441. Qu'est-ce qu'un modèle d'affectation ?

Un modèle d'affectation représente et simule le choix d'itinéraire sur un réseau de transport, avec de multiples lieux de départ et d'arrivée et potentiellement de multiples chemins entre chaque lieu de départ et chaque lieu d'arrivée. Ainsi, d'une part il représente les chemins possibles et décrit leurs qualités respectives. D'autre part, il répartit le trafic entre les itinéraires concurrents selon des règles de comportements, ceci afin notamment de calculer une charge de circulation pour chaque route du réseau. « L'objectif est de livrer une image réaliste (reproduire une situation connue) ou plausible (projeter une situation virtuelle) de l'image du réseau de transport par les auteurs des déplacements » (Leurent, 1997). Le modèle d'affectation sert donc à simuler la réaction des conducteurs (= la demande) face à une modification du réseau (= l'offre), par exemple la mise en place d'une nouvelle route, ou une restriction locale de capacité, ou l'instauration d'un péage sur une route, etc.

Un modèle d'affectation suppose :

1.
une représentation de l'offre routière : itinéraires, réseau, limites de capacité. La représentation de l'offre routière a fait l'objet d'une section du chapitre précédent ;
2.
une méthode d'affectation ;
3.
des hypothèses mécaniques, à savoir principalement les lois voulant reproduire le fonctionnement technique de l'infrastructure de transport : lois liant le temps de parcours sur un axe au débit pour représenter les premiers stades de congestion, voire des contraintes de capacité qui limitent le débit sur les axes ;
4.
des hypothèses comportementales concernant la demande : la dépendance du volume de demande envers le niveau de service (l'élasticité de la demande), la différenciation de plusieurs comportements parmi les usagers, le degré d'information et la précision de la connaissance tant des chemins possibles que des conditions de circulation, la rationalité des choix qui s'exprime par la recherche d'un chemin minimisant le coût généralisé subjectif du demandeur ;

5.

d'autres hypothèses statistiques comprenant d'abord le réalisme d'un état moyen du système de transport (pour les réseaux routiers urbains, on représente typiquement l'heure de pointe du matin ou du soir moyenne des jours ouvrables), puis la mesurabilité des différents paramètres (comme la valeur du temps).

4411. Les méthodes d'affectation

a. Les principes

Au cours de l'étape d'affectation, un ensemble de règles ou de principes sont utilisés pour charger une matrice de déplacements sur un réseau et ceci de façon à produire un ensemble de flux sur chaque lien du réseau. Ce n'est cependant pas le seul résultat de l'étape d'affectation. Il existe plusieurs objectifs qui ne sont pas inutiles à prendre en considération. Les principaux objectifs sont : estimer les coûts de déplacements zone à zone pour un niveau de demande donné, obtenir des mesures raisonnables des débits sur les tronçons et identifier les tronçons congestionnés.

Les inputs de base nécessaires pour l'affectation sont :

la matrice des déplacements exprimant la demande. Elle doit être exprimée en heure de pointe dans les aires urbaines congestionnées. Les matrices sont disponibles à la base en nombre de déplacements de personnes, elles doivent être converties en déplacements de véhicules.

un réseau, c'est-à-dire les arcs et leurs propriétés comportant les courbes débit-vitesse.

les principes et les règles de sélection des itinéraires.

b. L'affectation « tout ou rien »

La méthode de choix d'itinéraire et d'affectation la plus simple est celle du « tout ou rien ». Cette méthode suppose qu'il n'y ait pas d'effet de congestion, que tous les conducteurs considèrent les mêmes attributs pour les choix d'itinéraire et qu'ils les perçoivent de la même façon. L'absence d'effet de congestion signifie que les coûts sur les tronçons sont fixes. L'hypothèse que tous les conducteurs perçoivent les mêmes coûts moyens signifie que tous les conducteurs allant de i vers j doivent choisir le même itinéraire. Ainsi, tous les conducteurs sont affectés à une seule route entre i et j et aucun conducteur n'est affecté à une autre, moins attractive. Ces hypothèses sont probablement raisonnables dans les cas de réseaux clairsemés et non congestionnés pour lesquels il n'existe que quelques alternatives d'itinéraires présentant des coûts très différents.

L'algorithme d'affectation lui-même est la procédure qui charge la matrice sur l'arbre

des chemins les plus courts et produit les flux sur les liens. Tous les algorithmes de chargement débutent avec une étape d'initialisation, ramenant à zéro les flux sur chacun des arcs.

c. Les méthodes d'affectation diversifiées

D'autres méthodes plus élaborées d'affectation existent.

Les méthodes stochastiques

Les méthodes d'affectation stochastiques du trafic mettent l'accent sur la variabilité dans la perception des conducteurs des coûts et de la mesure composite qu'ils cherchent à minimiser (distance, temps de déplacements, coûts généralisés, *etc*). Ces méthodes considèrent les itinéraires de second rang (*second-best route*). Elles sont fondées sur une appréciation subjective des longueurs des arcs par les usagers, permettant de déterminer directement (sans itération) un ensemble d'itinéraires possibles entre un lieu d'origine et un lieu de destination. La méthode consiste à ajouter à la longueur réelle de chaque tronçon, dans des conditions précises de circulation, une variable aléatoire, généralement de moyenne nulle, dont la loi de distribution caractérise la différence d'appréciation des voyageurs. Un nombre n d'estimations des longueurs de chaque arc du réseau permet dans chaque cas de calculer le chemin le plus court entre chaque origine et chaque destination. Il existe donc n itinéraires possibles pour chaque couple O-D.

Les méthodes avec contrainte de capacité

Le modèle d'affectation peut être rendu plus réaliste par l'introduction de restrictions de capacité sur les itinéraires. Ce procédé, qui a le mérite de tenir compte des possibilités existantes, suppose que soit définie pour chaque arc une capacité correspondante au débit que cet arc peut écouler à la vitesse à vide (débit qui est proche du débit maximum) qui caractérise le niveau de service. Le temps de parcours sur l'arc n'est donc pas fixé, mais dépend de la charge supportée à cette capacité. En pratique, le débit ne peut excéder la capacité limite : si les besoins de déplacements dépassent ce seuil, l'excédent doit, ou bien attendre en amont, ou bien changer d'itinéraire ou d'horaire, ou de mode, ou encore renoncer au déplacement. L'usage courant, dans les modèles statiques, est de ne pas limiter explicitement les capacités. Une solution intéressante et réaliste est l'affectation incrémentale. Les usagers supposés rationnels cherchent à minimiser leur temps de parcours et tendent donc à emprunter les arcs les moins chargés. Le réseau est chargé par fraction en tenant compte à chaque chargement de la charge précédente pour déterminer le temps généralisé pour chaque itinéraire. Le trafic est à chaque incrément affecté à l'itinéraire qui présente le temps généralisé le plus faible par la méthode du tout ou rien, ou entre les meilleurs itinéraires.

L'affectation avec contrainte de capacité est donc plus pertinente car elle permet de prendre en compte le fait que les temps de parcours effectifs sont eux-mêmes liés aux volumes de circulation, et nécessitent l'introduction d'une relation débit-vitesse.

La méthode d'affectation dynamique

Les modèles exposés précédemment supposent essentiellement que la congestion est constante au cours de la période de temps examinée (qui correspond le plus souvent

au pic horaire du matin). Certains auteurs considèrent que cette hypothèse n'est que peu satisfaisante dans un contexte urbain car il existe un grand nombre de situations diverses qui correspondent à la même densité moyenne et produisent des vitesses moyennes très différentes.

Vickrey (1969) a formulé le premier un modèle dynamique « d'équilibre partiel ». Ce modèle est dynamique dans le sens où la vitesse des véhicules dépend de l'heure de la journée. Vickrey se contente dans son article de base de décrire la situation d'une seule O-D et une seule route, le nombre de navetteurs étant constant. Ce modèle décrit les déplacements domicile (O) - lieu de travail (D) pour un pic horaire du matin. La fonction objectif de l'individu est bi-critère : l'automobiliste désire minimiser son temps de trajet mais aussi arriver à une heure donnée à sa destination. Le modèle METROPOLIS développé par de Palma *et alii* (1996) propose ce type d'approche³⁸.

4412. Le comportement des usagers en matière de choix d'itinéraire

La description du comportement des usagers en matière de choix d'itinéraire renvoie à des hypothèses comportementales des usagers et à la fonction de temps généralisé. Les hypothèses comportementales renvoient, d'une part, à la rationalité des usagers qui les conduit à rechercher l'itinéraire qui minimise le coût généralisé de transport, et d'autre part, par l'élasticité de la demande au niveau de service.

Le déplacement est motivé par l'attrait du lieu de destination pour le voyageur qui souhaite y mener une activité. L'hypothèse centrale est que le voyageur cherche à optimiser son déplacement : soit en allant au plus court, soit en consacrant le moins de temps possible, soit en réduisant au minimum les dépenses monétaires, soit en préférant le confort, *etc.* On retient très souvent que la rationalité des usagers les conduit à choisir les trajets qui minimisent les coûts entraînés par les déplacements. Ce sont les coûts ou temps généralisés de déplacements qui sont pris en considération. Par ailleurs, le rôle joué par l'information détenue par les usagers est non négligeable. Les choix d'itinéraire des usagers de transport dépendent en effet à deux titres de l'information qu'ils détiennent. D'une part, l'information quant aux chemins potentiels sur le réseau : il faut connaître un itinéraire pour le suivre. D'autre part, la connaissance des caractéristiques des chemins identifiés entre lesquels le demandeur va choisir : la longueur, la vitesse probable ou habituelle ou annoncée, les péages attendus, autant d'éléments sur lesquels se construit une idée du temps nécessaire et des dépenses probables. En règle générale, dans les modèles statiques d'affectation, l'information est supposée parfaite, c'est-à-dire que la connaissance des conditions de déplacements est acquise avant le départ, qu'elle s'étend à un éventail de chemins spécifiés *a priori*.

³⁸ Il consiste en un programme itératif qui procède en deux phases séquentielles : - l'affectation dynamique des usagers dans le réseau de transport ou choix de route : étant donnée une heure de départ, chaque usager choisit un chemin en tâchant de minimiser son temps de trajet. Il dispose pour cela d'informations historiques (itérations précédentes) et actuelles sur l'état de la congestion du réseau de transport ; - le choix des temps de départ ou processus d'ajustement : après chaque journée simulée, les usagers peuvent modifier leurs temps de départ en accord avec l'expérience accumulée de manière à maximiser leur fonction objectif.

4413. La fonction débit-vitesse ou fonction de congestion

Il existe des concepts importants en relation avec les flux de trafic qui doivent être pris en considération dans la définition du réseau de transport. Ces concepts sont les volumes de flux (le débit), la densité, la capacité d'un arc et la vitesse. La mise en relation de ces concepts permet d'énoncer un certain nombre de lois permettant ainsi de représenter les conditions de circulation sur le réseau. Plusieurs types de relation peuvent être étudiées : la relation densité-débit, la relation débit-vitesse, la relation densité-vitesse, la relation débit-temps. Elles permettent essentiellement d'énoncer des lois mécaniques de circulation et de représenter la congestion d'un point de vue technique.

La figure 5-4 met en relation le débit et la densité. Lorsque la densité est nulle, les flux seront nuls de la même façon que lorsque la densité est à son maximum. Au point intermédiaire, le débit sera à son maximum. Le maximum fait en général référence à la capacité du tronçon. La vitesse moyenne est définie comme le rapport du débit sur la densité c'est-à-dire la pente de OA, OB et OC. OC est la vitesse moyenne à vide équivalente à la vitesse des véhicules lorsque la route est relativement dégagée. Lorsque la densité augmente de zéro au point maximum, la vitesse moyenne décroît de la vitesse à vide vers zéro.

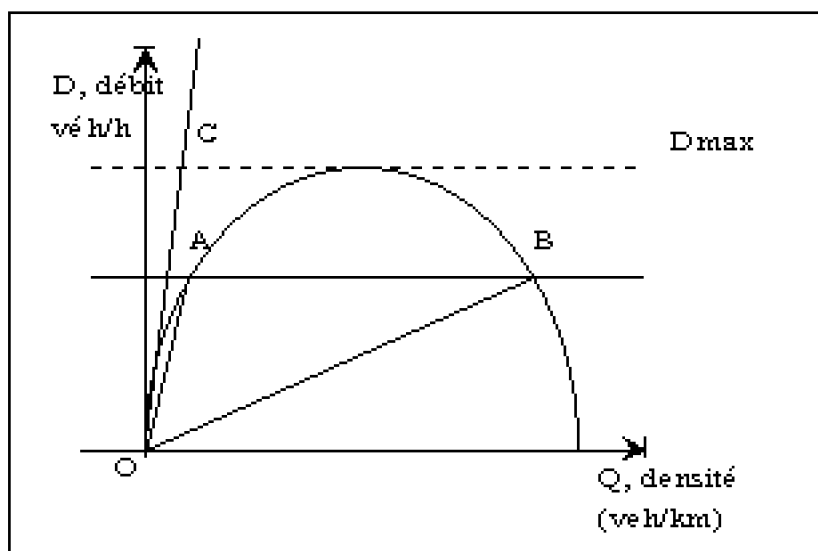


Figure 5-4. Relation densité-débit

La figure 5-5 est la conséquence directe de la figure 5-4. Elle met en relation le débit et la vitesse. Si le débit est nul, la vitesse sera à son maximum, égale à la vitesse à vide. Lorsque le débit augmente, la vitesse tend à diminuer après une période de stagnation. Lorsque le débit se rapproche de la capacité, le taux de décroissance de la vitesse augmente. Lorsque le débit atteint son maximum (le niveau des capacités) et lorsque des tentatives sont réalisées afin de forcer les débits au delà de cette valeur, nous entrons dans une zone instable avec des flux faibles et des vitesses faibles. De façon similaire, lorsque la densité du trafic augmente, la vitesse décroît également, jusqu'à ce que la saturation soit atteinte, la vitesse est de zéro (figure 5-6). La relation densité-vitesse peut raisonnablement être approchée par une fonction décroissante non affine. Pour des

vitesse élevées, la densité de trafic tend vers zéro. Au fur et à mesure que la densité s'accroît, la vitesse s'abaisse jusqu'à devenir nulle. La relation débit-vitesse mérite une attention particulière. En effet, il s'agit d'une loi fondamentale et presque universelle des techniques de circulation qui est qu'au dessus d'un certain niveau de trafic, une charge additionnelle produit une réduction de la vitesse et/ou une augmentation du coût. La relation débit-vitesse présente trois moments. Préalablement, la vitesse est maximale pour des débits faibles (la vitesse est dite « libre » ou vitesse à vide). Puis, dans un premier temps, la vitesse décroît à mesure que le débit augmente. Cela correspond aux régimes de circulation fluide, sans contrainte extérieure. Dans un deuxième temps, la vitesse s'abaisse à débit constant. Ceci correspond aux régimes où le débit maximal est contraint par l'amont. Dans un troisième temps, la vitesse s'abaisse à débit décroissant. Ceci correspond aux régimes où le débit est contraint par l'aval (la demande de circulation n'est pas immédiatement servie en totalité, elle s'accumule en deçà d'un goulot d'étranglement causé par exemple par la confluence de plusieurs axes sur un même carrefour). La relation débit-vitesse est de forme parabolique. Celle-ci indique qu'un même débit peut être obtenu à l'aide de deux vitesses différentes.

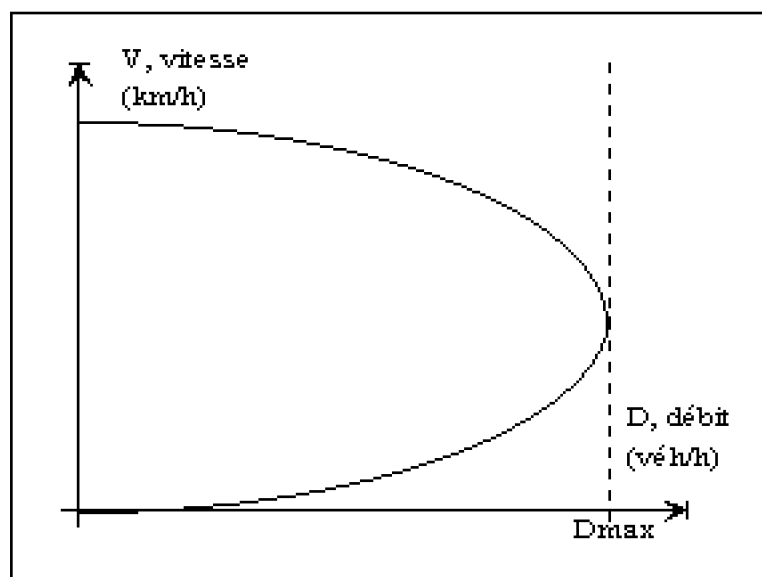


Figure 5-5. La relation débit-vitesse

Un modèle d'affectation routier doit tenter de reproduire la dépendance mécanique du temps de parcours en fonction du débit écoulé. En pratique, deux stades de congestion peuvent être représentés sans trop de difficultés : les régimes fluide et chargé, quand la vitesse décroît à mesure que le débit croît, et le régime saturé à débit constant. En revanche, les modèles statistiques ne peuvent représenter rigoureusement les congestions fortes où le débit et la vitesse décroissent simultanément (congestion en aval).

La représentation des régimes de congestion évoqués passe par la définition d'une dépendance fonctionnelle du temps de parcours à l'égard du débit écoulé, ainsi que d'un débit maximal pour le régime saturé à débit constant (ceci correspond à la notion de capacité, bien que dans la réalité la capacité varie en fonction de causes extérieures

diverses, aussi bien des facteurs techniques ou des comportements que des conditions météorologiques).

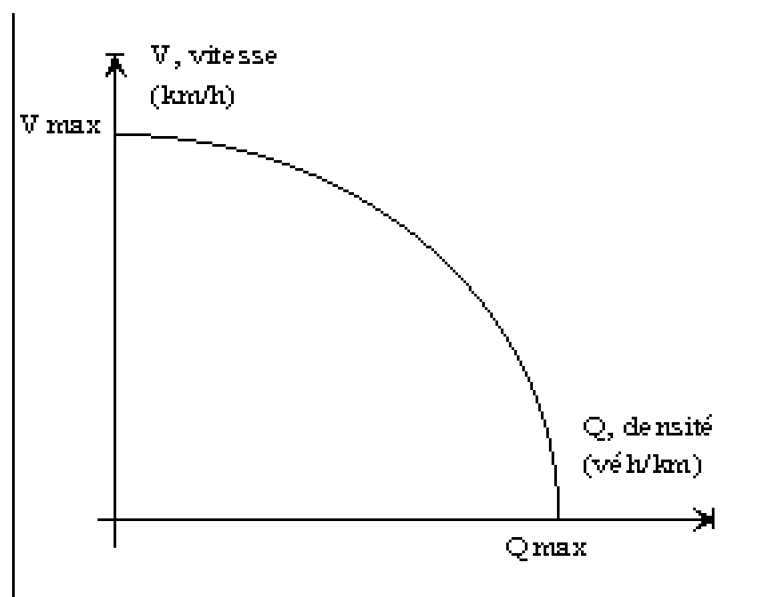


Figure 5-6. Relation densité-vitesse

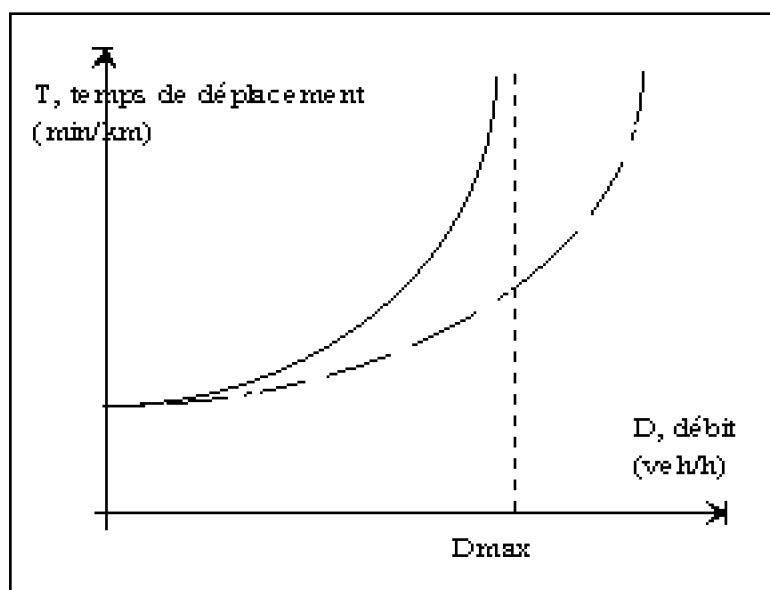


Figure 5-7. Relation débit-temps

Enfin, la figure 5-7 montre la situation sur un tronçon particulier avec une capacité donnée et une vitesse à vide donnée. Lorsque davantage de trafic pénètre sur le tronçon, le rapport débit/capacité (V/C) augmente jusqu'à ce qu'il atteigne un maximum, ce qui se produit lorsque le volume égalise la capacité. La spécification de la relation débit-vitesse reste délicate³⁹.

Les modèles d'affectation font l'objet de nombreux développements et de recherches et certains sont très élaborés. Dans le cadre de notre modèle, un module d'affectation a

été intégré. Celui-ci est très simplifié et vise à représenter globalement les contraintes de l'offre de transport qui s'exercent sur la demande. Son principe est exposé à la suite.

442. Un modèle d'affectation simplifié

4421. Principes généraux

Le modèle d'affectation que nous proposons est très simplifié compte tenu du découpage géographique (macro-zonage) et de la description du réseau routier que nous avons adopté. En effet, nous rappelons que le réseau routier n'est pas décrit en tant que tel mais par le biais des capacités globales zone à zone. La procédure d'affectation consiste, dans notre cas, à répartir les déplacements O-D sur des itinéraires zone à zone. Cette procédure d'affectation, somme toute très sommaire, permet de représenter les conditions globales de circulation, étant donné les niveaux de service d'offre de transport. Elle permet d'intégrer explicitement dans le modèle des contraintes de transport, et de considérer les effets de la congestion. L'objectif n'est de donner que des indicateurs très globaux de la congestion.

Dans un premier temps, la méthode d'affectation retenue pour le modèle sera exposée, puis les paramètres associés seront présentés. Enfin, le principe de l'affectation des flux de transports collectifs sera brièvement expliqué.

4422. Une affectation routière incrémentale en tout ou rien

L'affectation est effectuée en introduisant les déplacements pour tous les motifs et intègre également les déplacements d'échange et de transit à travers l'agglomération. La méthode d'affectation retenue est l'affectation incrémentale en tout ou rien. La matrice totale en heure de pointe du matin est affectée en plusieurs tranches, avec une recherche des plus courts chemins et une affectation en tout ou rien à chaque itération. Ainsi, le module routier réalise la recherche du meilleur itinéraire en temps pour chaque origine-destination, l'affectation d'une première partie des déplacements sur ces itinéraires, le calcul des temps en fonction de la charge des liaisons ; puis les mêmes opérations (itinéraires, affectation, temps en charge) sont répétées pour une seconde partie des déplacements, etc. La matrice des déplacements est ainsi découpée en n tranches identiques. Le calcul des temps en charge se fait en fonction d'une courbe donnant le rapport vitesse / vitesse à vide en fonction du rapport charge / capacité. Le module de recherche des plus courts chemins est inspiré de l'algorithme de Ford (cf. annexe 5-3).

4423. Les paramètres du modèle d'affectation

³⁹ Certains auteurs ont proposé des spécifications des fonctions débit-vitesse suivantes : Smock (1962) à propos d'une étude sur Détroit : $t = t_0(1 + \alpha \frac{Q}{Q_s})^\beta$ temps de déplacement par unité de distance, t_0 temps de déplacement par unité de distance sous des conditions de flux de déplacements faibles, Q_s la capacité sur le tronçon, V_0 le flux sur le tronçon. Overgaard (1967) Q_p est la capacité pratique du tronçon, α et β des paramètres de calage. La fonction la plus connue est proposée par le Bureau of Public Roads (1964) aux Etats-Unis :

Plusieurs paramètres doivent être calculés pour les besoins de l'affectation. A l'issue du module de partage modal, nous disposons de matrices de déplacements de personnes en O-D à la journée par motif. Celles-ci doivent être converties en matrices de déplacements de véhicules, puisqu'il s'agit bien de représenter les conditions de circulation. Le calcul d'un taux d'utilisation des véhicules est donc nécessaire. En outre, il est plus pertinent en milieu urbain d'effectuer l'affectation en période de pointe, puisque c'est à cette période de concentration des flux que les contraintes de l'offre se font le plus ressentir. La matrice des déplacements à la journée doit être convertie en matrice à l'heure de pointe. Des coefficients de pointe doivent être donc calculés. Enfin, un élément essentiel du modèle d'affectation est la courbe débit-vitesse.

a. Les coefficients de pointe horaire

1) Détermination de la pointe horaire

Dans le modèle, il a été convenu d'effectuer un passage en heure de pointe du matin pour les raisons suivantes :

- le nombre de déplacements est du même ordre le matin et le soir, mais leur longueur moyenne est plus élevée le matin (part plus importante du domicile-travail) ; le nombre de veh.km qui mesure la charge du réseau est donc sensiblement plus important le matin,

- la structure des déplacements se prête mieux à la modélisation le matin, elle est en effet plus simple et largement dominée par le motif domicile-travail et domicile-enseignement. Ce sont des déplacements contraints donc moins volatiles, des déplacements incompressibles ; des déplacements réguliers et sur lesquels on dispose du maximum de données ;

- enfin, il est pédagogiquement plus intéressant de raisonner dans le sens quittant le domicile (domicile vers travail, domicile vers achats) plutôt que sur les retours.

La période horaire dans la matinée qui comptabilise le maximum de déplacements en véhicule particulier est la tranche 7h30 - 8h30. Cette tranche horaire représente 10,2% du total des déplacements, 14,8% du total des déplacements pour le motif domicile-travail, et 8,3% du total des déplacements pour les autres motifs.

2) Calcul des coefficients de pointe

Plusieurs coefficients de pointe doivent être calculés. Considérer un coefficient uniforme de pointe revient à négliger les différences de temporalité des déplacements. La composition des flux à la pointe du matin a conduit à regrouper les déplacements en deux grands motifs pour le calcul des coefficients de pointe : résidence - travail et le reste. En outre, les coefficients de pointe dépendent également du type de liaison. Pour chaque

type de motif, le calcul des coefficients de pointe a été éclaté selon la liaison géographique considérée (centrale, radiale, tangentielle).

Les coefficients de pointe pour le motif résidence - travail sont nommés p_{ij} . Les coefficients de pointe pour le reste des motifs sont nommés m_{ij} . Les déplacements pour le motif résidence - travail en heure de pointe représente 24,7% du total des déplacements pour ce motif. Les déplacements pour le reste des autres motifs en période de pointe représente 13,5% du total des déplacements autres motifs. Les tableaux suivants présentent les coefficients de pointe par type de liaison.

Tableau 5-32. Coefficients de pointe pour les déplacements résidence-travail (calculs des p_{ij}) - Enquête ménage 95

en %	Centre	Banlieue	Périphérie
Centre	26,7	29,6	16,4
Banlieue	22,0	27,3	23,3
Périphérie	17,8	29,3	24,4

Tableau 5-33. Coefficients de pointe pour les déplacements autres motifs (calculs des m_{ij}) - Enquête ménage 95

en %	Centre	Banlieue	Périphérie
Centre	15,7	2,6	8,6
Banlieue	10,9	15,5	6,0
Périphérie	9,4	13,5	15,2

3) Evolution du coefficient de pointe

Il reste, pour l'application en prévision, à se demander quel sera le sens de variation des coefficients p_{ij} et m_{ij} . On peut dire que :

les coefficients p_{ij} (coefficient horaire des déplacements pour le motif résidence - travail) ont une tendance globale à diminuer lentement avec l'étalement des horaires de travail, et la réduction de ceux-ci ;

les coefficients m_{ij} ont tendance à augmenter rapidement avec l'augmentation de la demande de déplacements pour achats, loisirs, etc.. Cependant, la croissance des coefficients m_{ij} est relativement lente, dans la mesure où ces déplacements ont tendance à se développer en dehors des heures de pointe.

Par mesure de simplification et pour limiter le nombre de paramètres incertains dans le modèle, les coefficients de pointe sont considérés comme constants au cours du temps.

b. Les taux d'occupation des véhicules

Pour le calcul des coefficients d'occupation des véhicules, les mêmes principes ont été adoptés. Les coefficients d'occupation des véhicules permettent de passer du nombre de déplacements de personnes au nombre de déplacements de véhicules, dans la mesure où l'affectation sur le réseau se fait en termes d'unités de véhicules. Dans la pratique, l'application des taux d'occupation des véhicules se fait en amont de celle des coefficients de pointe. Le taux d'occupation des véhicules quelque soit le motif et sur la journée s'élève à 1,29, c'est-à-dire qu'il y a 1,29 personnes par véhicule en moyenne. A l'heure de pointe du matin, ce taux s'élève à 1,34.

La décomposition en motifs fait apparaître que le taux d'occupation des véhicules est nettement moins élevé pour le motif résidence - travail que pour les autres motifs (1,08 contre 1,83 en moyenne).

Tableau 5-34. Taux d'occupation des véhicules en heure de pointe du matin pour le motif résidence-travail (enquête-ménage 95)

	Centre	Banlieue	Périphérie
Centre	1,07	1,20	1,03
Banlieue	1,04	1,06	1,04
Périphérie	1,07	1,08	1,13

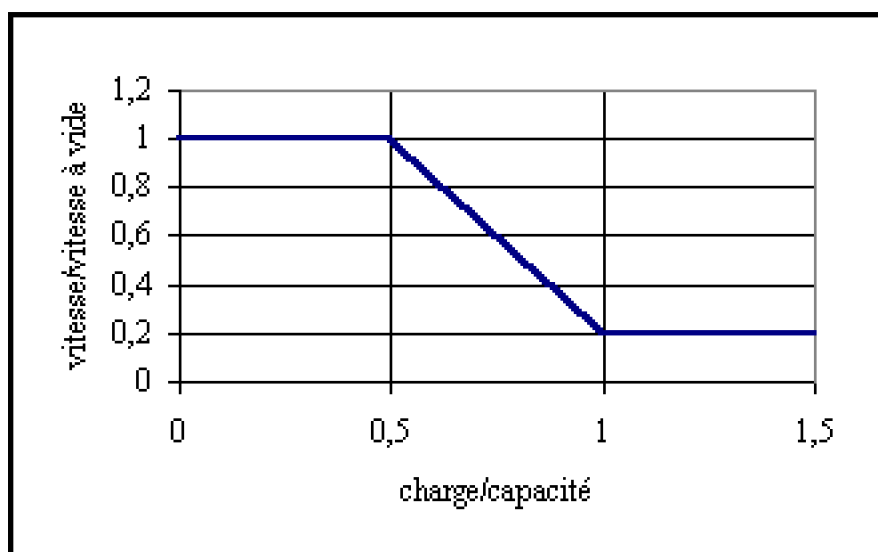
Tableau 5-35. Taux d'occupation des véhicules en heure de pointe du matin pour les autres motifs (enquête-ménage 95)

	Centre	Banlieue	Périphérie
Centre	1,78	2,06	1,94
Banlieue	1,88	1,80	1,82
Périphérie	1,72	1,62	1,99

c. La courbe débit-vitesse

Les enquêtes-ménages ne donnent pas assez de données fines sur les situations de congestion pour pouvoir caler directement la relation débit-vitesse. On se ramène à une courbe de forme classique, dont on vérifie qu'elle produit des résultats réalistes. Cette courbe débit-vitesse est reprise du modèle stratégique⁴⁰ et présentée dans le graphique suivant.

⁴⁰ LET, SEMALY (1997). *Développement d'un modèle stratégique de simulation des déplacements - Présentation générale*.
 Décision d'aide à la Recherche n° 96MT0012, DRAST, Grand Lyon, Conseil Général 69, SYTRAL, Lyon.



Graphique 5-2. La courbe débit-vitesse

4424. L'affectation des déplacements en transports collectifs

Dans le modèle, il n'y a pas d'affectation à proprement parlé en ce qui concerne les transports collectifs. Un modèle de recherche d'itinéraire est nécessaire, mais dans la mesure où nous posons l'hypothèse que le réseau des transports en commun n'est pas contraint en capacité, le module d'affectation est superflu. Le module de recherche d'itinéraire pour les déplacements en transports collectifs est plus complexe que celui en voiture particulière, essentiellement parce que contrairement au module routier, le principe de Bellman ne peut lui être appliqué : ce principe dit que si le plus court chemin entre les points i et l passe par les points j et k , alors la portion de l'itinéraire comprise entre j et k est le plus court chemin entre ces deux points. Or, dans le cas des transports collectifs, il se peut fort bien par exemple qu'il soit intéressant de prendre une liaison ferroviaire, passant par j et k , pour aller de i à l , mais que le mode le plus intéressant entre j et k soit le bus. Il faut distinguer les caractéristiques de chaque liaison interzone selon qu'elle est utilisée comme maillon unique, intermédiaire ou final d'un déplacement. Le module a comme objectif de calculer les temps de parcours en origine-destination.

45. L'évolution du taux de motorisation

Le taux de motorisation joue un rôle important dans le modèle. Il intervient à plusieurs niveaux. Premièrement, il détermine l'évolution des coefficients de conductance des modèles de distribution de déplacements. Deuxièmement, il intervient dans le partage des déplacements entre modes légers et modes motorisés. Enfin, il intervient dans le partage modal entre voiture particulière et transports en commun.

L'importance du taux de motorisation sur la structure modale et sur les tendances d'évolution de la structure spatiale des déplacements étant affirmée, il nous faut maintenant voir dans une perspective exploratoire, l'évolution probable du taux de motorisation.

Tout comme les déplacements, les déterminants du niveau et des variations de la motorisation sont nombreux. On les classe généralement en trois catégories : les facteurs liés aux catégories socio-économiques des ménages (revenu, nombre de personnes, âge, etc.), ceux liés à la localisation (urbain, rural), ceux liés aux coûts d'utilisation de la voiture (prix d'achat, coût de fonctionnement, d'entretien). Mais de nombreuses études visant à cerner l'évolution des taux de motorisation des ménages mettent en avant le rôle prépondérant des revenus. Le lien entre la variable revenu et la variable motorisation est très marquant⁴¹. A partir de l'enquête ménage de 1995, nous obtenons la relation suivante :

$$Motor = 0,2538 \ln(R) - 1,7570$$

avec

Motor : le taux de motorisation,

R : le niveau moyen du revenu du ménage.

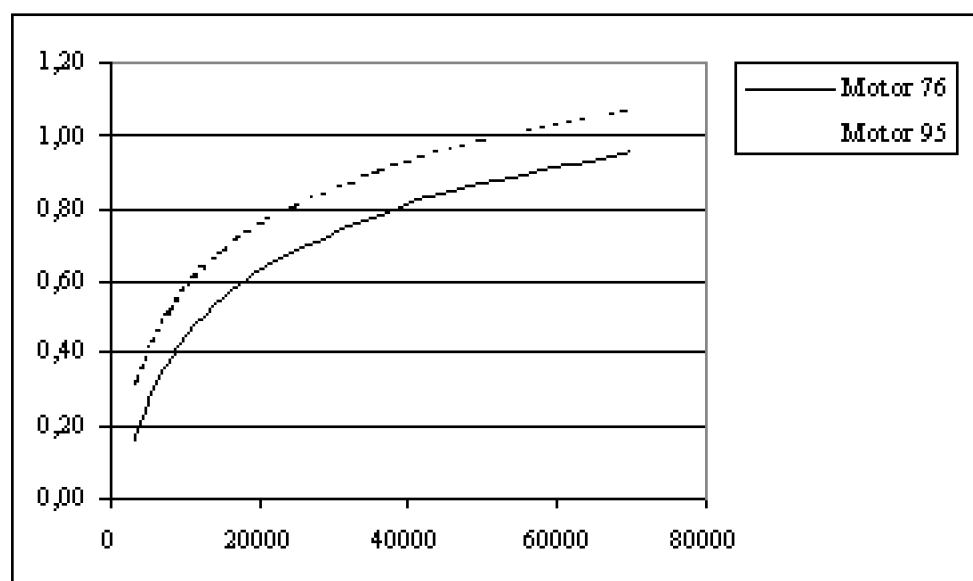
Tableau 5-36. Résultats de l'ajustement de la relation $Motor=f(R)$ selon l'enquête ménage de 1995

	R²	0,96
	R² ajusté	0,95
	ln(R)	Constante
coefficient	0,25	-1,76
écart-type du coefficient	0,022	0,206
rapport t	11,61	-8,51
P[T > ;t]	0,0000	0,0001

Tableau 5-37. Résultats de l'ajustement de la relation $Motor=f(R)$ selon l'enquête ménage de 1976

	R²	0,99
	R² ajusté	0,99
	ln(R)	Constante
coefficient	0,26	-1,967681080
écart-type du coefficient	0,009	0,092
rapport t	26,30	-21,41
P[T > ;t]	0,0000	0,0000

⁴¹ Cependant, il semble exister un certain niveau de saturation. On peut difficilement envisager une situation où chaque individu (enfants et personnes âgées comprises) posséderait sa voiture propre (ou qu'un nombre suffisant de personnes possède plusieurs véhicules afin de palier au phénomène de structure d'âge qui implique une non-motorisation de fait).



Graphique 5-3. Stabilité de la dépendance entre taux de motorisation et revenu (régressions de 76 et de 95).

A partir de ces spécifications, les élasticités du taux de motorisation au revenu sont supposées constantes. Cependant, la valeur de l'élasticité observée en 1976 et en 1995 n'est pas invariante. En 1976, elle s'élève à 0,52, en 1995, son niveau n'est plus que de 0,41 en 1995. L'élasticité de la motorisation au revenu a donc connu une baisse entre 1976 et 1995. Ceci peut s'expliquer assez logiquement dans la mesure où les années soixante-dix sont encore une période d'équipement des ménages. Par la suite, l'équipement des ménages se réalise à un rythme moins important. La question qui se pose alors est de savoir si cette élasticité va encore connaître une baisse ou se stabiliser. Nous ne disposons pas de données suffisantes afin d'infirmer ou valider l'une ou l'autre de ces hypothèses. Ceci fera l'objet d'hypothèses scénariales.

Ayant déterminé à la fois le niveau de la mobilité globale et le taux de motorisation en fonction des revenus, nous devons vérifier de ne pas comptabiliser deux fois un même effet. D'une part, le niveau de la mobilité est fixé une fois pour toute, et déterminé uniquement par l'évolution des seuls revenus. D'autre part, l'impact de la motorisation n'intervient que dans la répartition de cette mobilité à l'intérieur des modes de transport par lesquels elle s'exerce et sur les tendances d'évolution de la répartition spatiale.

Section 5. La mise en place des rétroactions dans le modèle

Dans les sections précédentes, le modèle a été décrit de façon linéaire. Chaque module représente une étape dans le processus de déplacement, et chaque module produit des sorties qui servent d'entrées au module suivant. Dans cette perspective, le modèle présente une structure conventionnelle de modèle de transport à quatre étapes, enrichie cependant par les modules de répartition spatiale des résidents et des activités économiques en amont. L'enchaînement linéaire des modules permet de simuler la demande de déplacements à un instant donné. Cette demande est conditionnée d'une

part par la structure urbaine des activités et des résidents puisque les déplacements n'existent que dans la perspective de la réalisation d'une activité, et d'autre part par les conditions de déplacements dépendant des caractéristiques d'offre. A ce niveau, le modèle présente une structure statique. Plusieurs éléments sont introduits dans le modèle afin de rendre dynamique cette structure. D'une part, de façon interne à chaque module, certains paramètres ne sont pas posés constants dans le temps. C'est le cas des coefficients multiplicateurs des emplois induits qui ont été projetés par rapport au temps. C'est le cas également des coefficients de conductance des modèles gravitaires de distribution, dont l'évolution suit celle de la motorisation. D'autre part, la structure du modèle est dynamisée de façon externe par l'introduction de boucles rétroactives permises par le fonctionnement en pas à pas du modèle. Ces boucles de rétroactions sont présentes à plusieurs niveaux dans le modèle et leur temporalité est distincte selon le motif considéré. Leur description est effectuée par la suite, en partant des rétroactions de court terme jusqu'aux rétroactions de long terme. Chacune de ces rétroaction représente l'effet d'une modification des conditions de déplacements (dont la source peut être multiple : modification de l'offre de transport, surcharge des réseaux du fait d'une forte augmentation de la demande de déplacements, etc.) sur la demande de déplacements, et à long terme sur les générateurs de cette demande.

- à très court terme, la première rétroaction considérée est celle des modifications des conditions de transport sur la répartition des déplacements sur les itinéraires du réseau routier. Cette rétroaction est prise en compte de façon interne dans le modèle d'affectation dans la mesure où l'affectation s'effectue par tranches successives et itératives et qu'à chaque itération les modifications de déplacements sur chaque tronçon sont représentées par la fonction débit-vitesse. Concernant cette rétroaction, les véhicules sont affectées sans distinction de motifs.

- à court/moyen terme, la deuxième rétroaction considérée met en jeu l'effet des modifications des conditions de déplacements, à savoir les temps généralisés sur le partage modal VP/TC. Cette rétroaction est mise en place pour les motifs de déplacements suivants : résidence-travail, résidence-achat, résidence-service, résidence-loisir et l'ensemble des autres motifs. La spécification du partage modal des déplacements pour ces motifs permet en effet d'intégrer cette rétroaction dans la mesure où une des variables du modèle est la différence des temps généralisés VP/TC. *A contrario*, le partage modal des déplacements pour les motifs de l'enseignement (primaire, secondaire et supérieur) ne peut pas être sensibilisé aux modifications des conditions de déplacements. Pour les motifs de l'enseignement primaire et secondaire, ceci peut être justifié par la contrainte de la carte scolaire. Une distinction temporelle concernant les temps de réaction du partage modal à la modification des conditions de déplacements est introduite selon les motifs. L'étalonnage des temps de rétroaction est arbitraire, et teint du bon sens dans la mesure où ces paramètres ne peuvent pas faire l'objet d'un calage. L'hypothèse posée postule que les déplacements contraints sont moins flexibles que les déplacements non contraints. Cette hypothèse est confortée par la valeur des coefficients de la variable de différence des temps généralisés dans les

modules de partage modal. En effet, la sensibilité à cette variable est plus élevée pour les motifs achat et loisir, c'est-à-dire des motifs non contraints. Ceci peut s'expliquer par le fait que le temps passé à effectuer ces activités est relativement plus faible que celui passé sur le lieu de travail, ainsi les individus acceptent moins facilement de consacrer beaucoup de temps à ces déplacements et cherchent la solution de transport la plus efficace en termes de temps et de coûts de déplacements. Le temps de rétroaction sur le partage modal pour les déplacements à motifs non contraints est posé égal à 2 ans. Le temps de rétroaction sur le partage modal des déplacements pour le motif travail est supposé être plus long et est posé comme étant égal à 5 ans.

- à moyen/long terme, la troisième rétroaction considère les effets de la modification des conditions de déplacements sur la distribution des déplacements. Les modules de distribution des déplacements sont en effet sensibilisés à la variable « temps généralisés » du fait qu'ils l'intègrent comme variable. Une distinction est réalisée sur les temps de rétroaction selon les motifs. Par ailleurs, les valeurs des coefficients de conductance se distinguent fortement entre les motifs. La valeur de la conductance est forte pour les motifs contraints comme le travail et l'enseignement supérieur. Ceci représente une forte résistance aux temps de déplacement : les individus acceptent de se déplacer plus longtemps pour réaliser ces activités. L'hypothèse qui en découle est alors que la distribution des déplacements pour ces motifs est relativement rigide aux modifications des conditions de déplacements du fait de la résistance aux changements de destination des déplacements pour ces motifs. Ceci est lié à un univers de choix plus restreint économiquement et spatialement des lieux de destination par rapport aux lieux possibles d'achat, de service, etc. L'hypothèse concernant les temps de rétroaction sur la distribution des déplacements contraints est de 5 ans, celle sur les déplacements non contraints est de 3 ans.

- à long terme, le dernier type de rétroaction se réalise sur la répartition spatiale des générateurs des déplacements. Il s'agit de la rétroaction du système de transport sur le système d'urbanisation. Les modifications des conditions de déplacements, portées par des changements dans les temps généralisés, entraînent des modifications des accessibilités. La répartition des activités urbaines et des résidents étant en partie conditionnée par des facteurs d'accessibilité, les modifications des conditions de déplacement ont donc des effets sur la structure urbaine. Ces effets se font à long terme. L'hypothèse est posée que les effets sur la répartition des localisations se manifestent avec un délai de 10 ans. En effet, les coûts de transaction, non pris en compte dans le modèle, sont élevés, ce qui explique une certaine inertie dans les changements de la répartition spatiale des lieux résidentiels et des activités urbaines.

L'ensemble de ces boucles rétroactives permet de rendre le modèle interactif. L'organigramme suivant représente ces boucles.

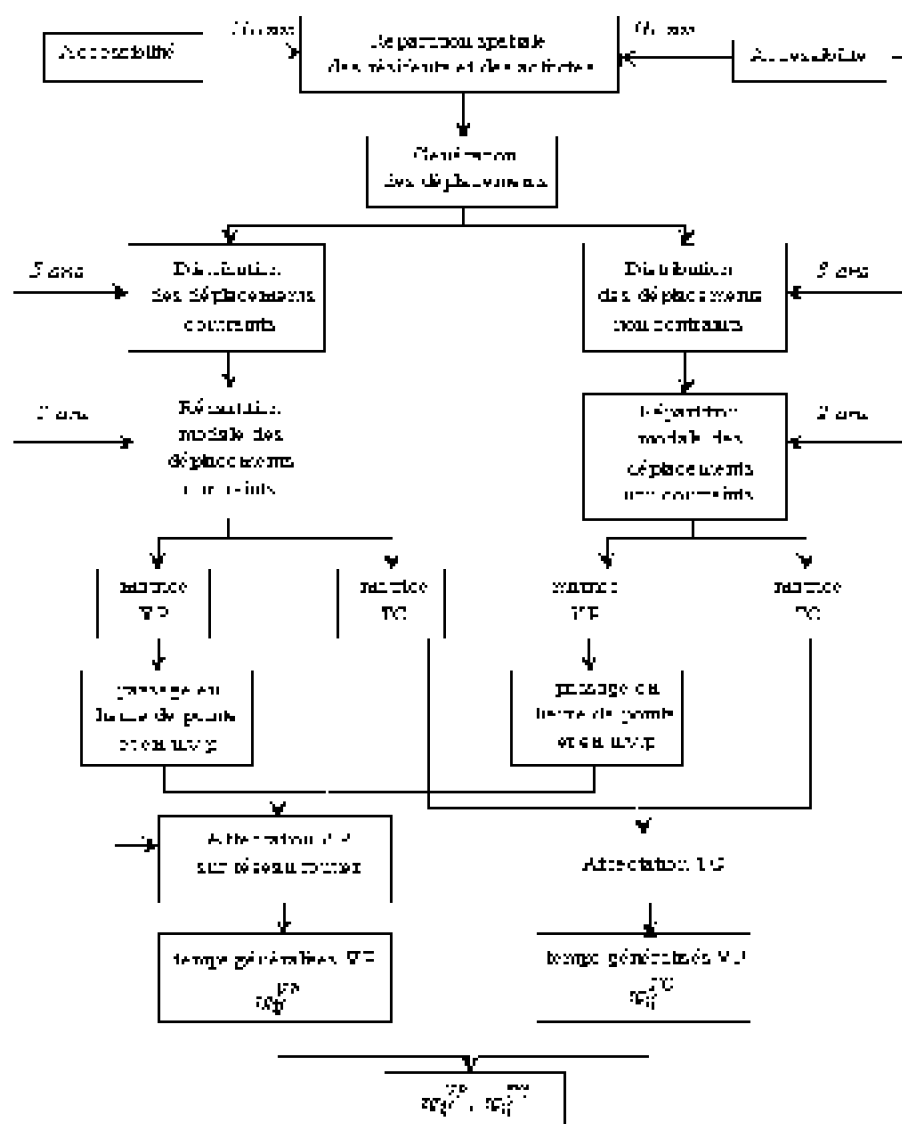


Figure 5-8. Les rétroactions dans le modèle et leur temporalité

Conclusion du chapitre 5

Le modèle a été construit afin de simuler les effets de politiques de transport contrastées, il doit donc fournir un ensemble d'indicateurs susceptibles de pouvoir servir de base à l'évaluation des effets de ces politiques. Les indicateurs de sorties du modèle sont les suivants :

- Les masses de déplacements de personnes distinguées selon le motif, le type de liaison géographique, le mode de transport ;
- Les masses de déplacements en véhicule particulier sur le réseau routier ;

- Les parts de marché des modes légers, des véhicules particuliers et des transports collectifs sur l'ensemble des déplacements et par motif ;

- Les volumes de déplacements exprimés en véhicule par kilomètre. Le rôle des distances parcourues dans l'évolution de la mobilité a souvent été souligné. Il est donc indispensable de considérer cet indicateur, notamment si on envisage d'effectuer un bilan environnemental.

- Les temps généralisés par mode ;

- Des mesures d'accessibilité : d'une part, une mesure de l'accessibilité à la population résidente, d'autre part, des mesures de l'accessibilité aux différents emplois induits.

L'objectif premier de notre travail de thèse était de parvenir à la construction d'un modèle opérationnel du système de déplacements prenant en compte les interactions transport-localisation et pouvant simuler les effets de politiques de transport et d'aménagement urbain. Ce travail s'est confronté de façon récurrente au problème de mesurabilité, ce qui nous a bien souvent contraint à adopter une spécification théorique simplifiée. La première démarche de validation du modèle a été l'estimation économétrique des différents modules le composant. Les résultats de ces estimations ont été exposés dans le présent chapitre. Cette démarche n'est cependant pas suffisante dans le cadre d'un modèle de simulation. La seconde démarche de validation consiste à soumettre le modèle à un ensemble de tests de sensibilité. Cela fera l'objet du prochain chapitre.

Chapitre 6. Les simulations du modèle : les avenir possibles des déplacements urbains

« La conception d'un système de transport efficace dans une économie urbaine réaliste constitue une tâche extraordinairement difficile ». Richard ARNOTT, *Revue Economique*, 1985.

Introduction

La construction du modèle a été présentée au chapitre précédent. Nous abordons à présent l'aspect " exploitation " de cet outil de simulation. Nous allons procéder en deux grandes étapes. Dans un premier temps, des tests de sensibilité du modèle aux variables d'entrée seront menés. Dans un second temps, la simulation de scénarios d'actions sur les déplacements et l'urbanisation seront envisagés. Le modèle a été élaboré afin d'être un outil d'aide à la décision. Il permet de quantifier l'évolution à long terme des

déplacements par mode sous diverses hypothèses. Plusieurs types de solutions peuvent être envisagés pour remédier à la crise des déplacements urbains (caractérisée par une hausse des déplacements en voiture particulière et des distances parcourues et une baisse de la part de marché des transports collectifs) :

Restreindre la mobilité en voiture particulière. La restriction de la mobilité en voiture particulière peut passer par différents leviers de commande : l'instauration de péage urbain, le stationnement payant, la diminution des capacités de stationnement.

Développer une offre alternative à la voiture particulière. Le développement de l'offre de transports collectifs est une nécessité dans les grandes agglomérations urbaines.

Aménager différemment le territoire urbain afin de réduire le recours à la voiture particulière et de diminuer les distances parcourues avec ce mode.

Ces scénarios s'inscrivent dans la démarche des Plans de Déplacements Urbains. La loi sur l'air de 1996 fait obligation aux grandes villes d'avoir approuvé avant le 30 décembre 1999 un PDU qui doit définir les principes généraux de l'organisation des transports, de la circulation et du stationnement, ainsi que les livraisons de marchandises, dans le périmètre des transports urbains d'une agglomération. Six objectifs sont fixés par la loi à savoir la diminution du trafic automobile, le développement des transports en commun et des modes économes et les moins polluants (marche à pied, deux roues), l'aménagement et l'exploitation du réseau principal de voirie, la réorganisation et l'aménagement du stationnement, le transport et la livraison de marchandises, l'encouragement aux entreprises et aux collectivités publiques à favoriser le transport de leurs employés par les transports publics ou le covoiturage. Notre modèle n'est pas en mesure d'évaluer la portée de chacune de ces actions, notamment parce qu'il ne considère pas le transport de marchandises en ville, et n'est pas non plus apte à tester les stratégies des entreprises en matière de politiques de déplacements. En revanche, les quatre premiers objectifs peuvent être pris en considération de façon plus ou moins fine.

Le modèle a pour objectif de simuler des évolutions sous différentes hypothèses. La première étape consiste à tester la sensibilité du modèle aux variables d'entrée. Cette opération revient à observer les effets sur les variables de sortie des variations d'une ou plusieurs variables d'entrée. La détermination d'un plan de simulation est rendue nécessaire par le nombre de variables mises en oeuvre par le modèle. Pour se faire, les variables d'entrée du modèle seront rappelées dans la première section de ce chapitre. Le plan de simulation nécessite également que soit défini un scénario de référence, appelé scénario fil de l'eau. Par la suite, des tests de sensibilité du modèle aux variables d'entrée seront proposés dans la deuxième section. Les tests envisagés concernent la sensibilité des résultats du modèle à la croissance du revenu, et la sensibilité à la variation de la valeur de l'élasticité de la motorisation au revenu. Les sections suivantes seront consacrées à l'analyse de simulations de scénarios contrastés de politiques de transport et d'aménagement urbain reprenant les trois types d'actions proposées plus

haut. Enfin, une synthèse des résultats sera proposée permettant de tirer des conclusions sur la portée et les limites du modèle et de dégager les principaux enseignements en termes de planification des transports.

Section 1. Les variables d'entrée du modèle et la construction d'un scénario de simulation de référence *fil de l'eau*

11. Les variables d'entrée du modèle

Les variables d'entrée du modèle peuvent être considérées selon quatre grandes familles qui décrivent : la répartition spatiale des paramètres d'occupation des sols, le contexte socio-économique, les commandes du système, les paramètres du modèle.

111. Les paramètres d'occupation des sols

Les variables de l'occupation des sols se distinguent en deux séries. La première série concerne les paramètres permettant de simuler la tendance de la croissance urbaine. La deuxième série vise à répartir spatialement les activités urbaines et les résidents.

1111. Les paramètres de la croissance urbaine

Le module de croissance urbaine s'inspire de la théorie de la base économique. Il met en jeu plusieurs variables d'entrée :

- Le taux de croissance des emplois basiques. Les emplois basiques que nous avons considérés dans le modèle sont les emplois strictement basiques et les emplois liés à la base, c'est-à-dire tous les emplois qui ne sont pas induits par les besoins de la population résidente. L'hypothèse est faite que l'évolution de ce taux peut se caler sur celui du PIB.

- Le taux d'activité de la population. Par mesure de simplicité, nous supposerons ce taux constant.

- Les coefficients multiplicateurs des emplois induits. Ces coefficients sont rendus endogènes dans la mesure où leur évolution est simulée (par une régression linéaire en fonction du temps).

1112. Les paramètres de la répartition de la population et des activités urbaines

La répartition spatiale des emplois basiques. Elle est posée comme étant exogène. Par défaut, la structure spatiale de distribution de ces activités est conservée mais des hypothèses scénariales peuvent être envisagées.

En ce qui concerne la répartition spatiale de la population, elle fait en partie l'objet d'une modélisation (pour le quart de la répartition). L'évolution des trois quarts de la répartition spatiale de la population obéit à des facteurs de croissance zonaux qui peuvent être modifiés par des hypothèses scénariales. L'évolution du quart restant de la répartition spatiale est modélisée sur la base des variables suivantes :

Un indicateur de l'accessibilité de la population résidente à l'ensemble des emplois. Cette variable est une variable intermédiaire dans la mesure où elle est calculée à partir des temps généralisés de transport, variables de sortie du modèle. Cette variable est endogène au modèle et ne peut pas être modifiée.

Les prix immobiliers de la zone. Il s'agit de données exogènes au modèle pouvant faire l'objet d'hypothèses scénariales.

La densité urbaine en termes de densité de population de la zone à la période précédente.

De la même façon, l'évolution de la répartition spatiale des emplois induits est en partie guidée par des facteurs de croissance zonaux de l'emploi, pouvant être modifiés, et en partie par une relation économétrique dont les variables sont :

Des indicateurs d'accessibilité des emplois induits à la population résidente. Il s'agit de variables endogènes.

Les prix immobiliers de la zone.

La densité urbaine en termes de densité d'emplois totaux à la période précédente.

112. Le contexte socio-économique

La variable concernant le contexte socio-économique général est le taux de croissance du revenu des ménages. Les hypothèses concernant son évolution sont calées sur celles du revenu national disponible brut des ménages. Par ailleurs, certaines variables du contexte socio-économique, non prises en compte dans les modules de développement urbain et de structuration urbaine, doivent faire l'objet d'hypothèses quant à leur évolution. Il s'agit de la population en âge d'être dans l'enseignement primaire, la population en âge d'être dans l'enseignement secondaire, la population étudiante, le nombre de places dans les établissements de l'enseignement secondaire, le nombre de places dans les établissements de l'enseignement supérieur. On suppose que l'évolution de chacune de ces variables suit l'évolution de la population totale.

113. Les commandes du système

Elles concernent les politiques d'action que l'on peut mettre en oeuvre sur le système de déplacements.

Les variables de commande concernant l'offre de transport privée sont les suivantes :

- * les capacités de stationnement zonal ; elles conditionnent en partie le temps de recherche d'une place de stationnement.
- * Les capacités routières de zone à zone.
- * Le coût du stationnement : Un coût uniforme par zone peut être introduit dans le modèle.
- * Les coûts routiers de coupure : ces coûts représentent le coût monétaire subi pour entrer ou sortir d'une zone. Ils peuvent ainsi représenter la mise en place d'un péage routier urbain.
- * Les vitesses à vide zone à zone.

Les variables de commandes concernant l'offre de transport public se déclinent en trois types d'offre : l'offre en site propre lourd, l'offre en site propre intermédiaire, l'offre en site partagé. Ainsi la première des variables d'entrée concernant l'offre en transport collectif est la spécification du type de réseau existant entre les différents couples de zones. A partir de cela, les variables d'entrée dépendent du type de réseau considéré. En ce qui concerne les réseaux en site propre et en site intermédiaire, les variables d'entrée sont : les temps d'accès au réseau, l'intervalle moyen de passage, le temps de parcours zone à zone. Ces temps sont supposés être des temps parfaitement cadencés. En ce qui concerne le réseau en site partagé, les variables d'entrée sont : les temps d'accès au réseau, l'intervalle moyen de passage, le niveau de priorité des bus sur la voirie, le tarif moyen de zone à zone.

114. Les paramètres

Les paramètres renvoient à des valeurs comportementales qui ne peuvent pas être modifiées de façon directe et qui, pour certaines, ont fait l'objet d'une estimation économétrique. Les paramètres essentiels dans le modèle sont les suivants :

• L'élasticité de la mobilité au revenu. Bien que nous ayons constaté l'invariance de ce paramètre dans le temps, rien ne permet d'affirmer qu'elle conservera dans le long terme sa valeur initiale. Toutefois, par mesure de simplicité, nous ne ferons pas d'hypothèse scénariale sur cette variable.

• L'élasticité de la motorisation au revenu. En presque 20 ans, l'élasticité de la motorisation au revenu a diminué. L'hypothèse de référence que nous posons est celle du maintien de la valeur de l'élasticité calculée en 1995 constante sur la période de simulation. Toutefois un test de sensibilité sera envisagé, s'appuyant sur une hypothèse de réduction de l'élasticité de la motorisation au revenu.

• Le coût kilométrique marginal d'un déplacement en voiture particulière. Il est fixé à 0,50 F/km. Par mesure de simplicité, ce coût est supposé constant (en francs courants).

• La valeur du temps. Une valeur du temps unique est considérée dans le modèle. On fait l'hypothèse que son évolution suit celle du revenu.

L'organigramme suivant récapitule l'intervention des variables d'entrée dans le modèle.

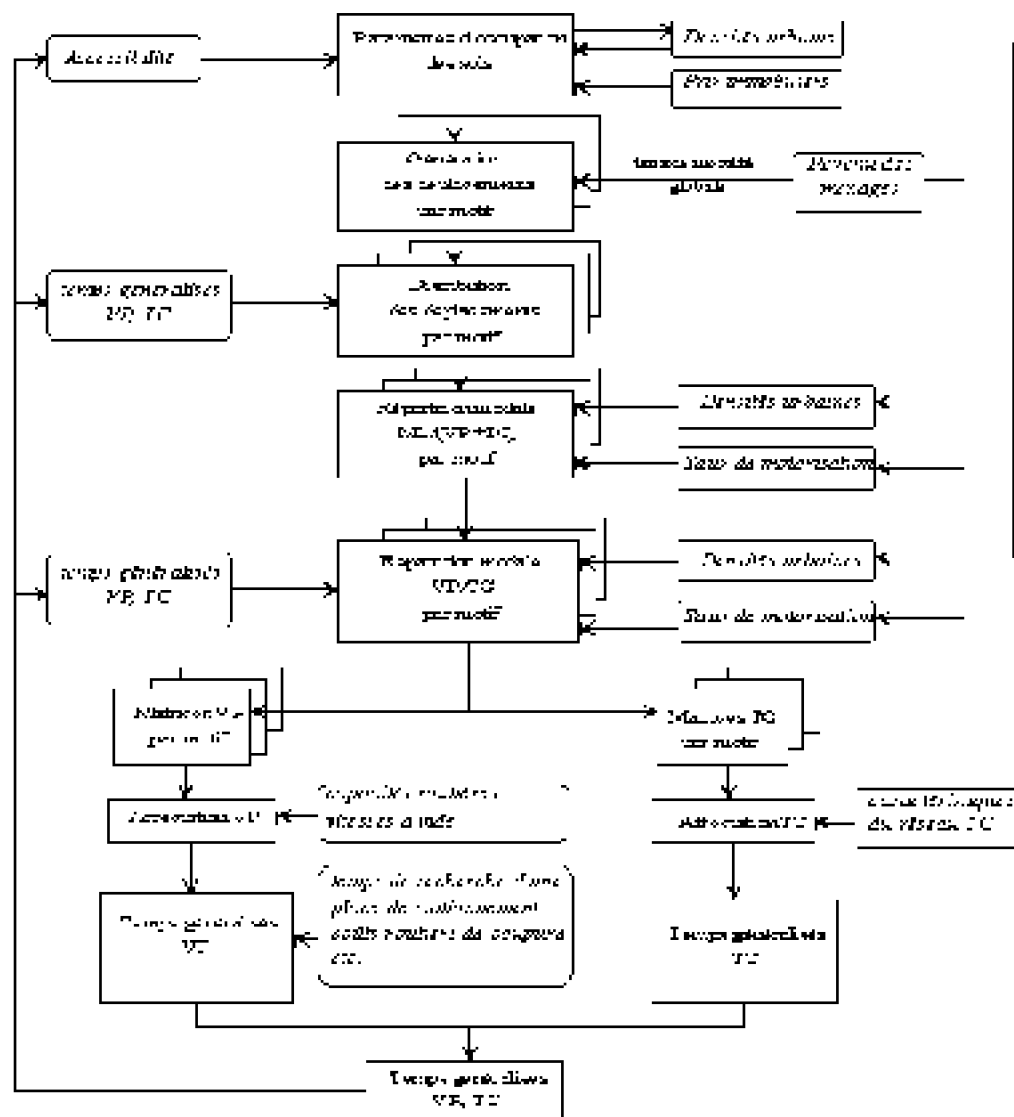


Figure 6-1. Intervention des variables d'entrée dans le modèle

In fine, nous constatons que le nombre de ces variables est élevé et que le nombre de leur combinaison l'est davantage. Il n'est donc pas envisageable de tester l'ensemble des combinaisons de ces variables. Les tests de sensibilité aux variables d'entrée sont réduits à une sélection de variables, c'est-à-dire celles qui jouent un rôle clé dans le modèle. Au préalable, afin de pouvoir effectuer des tests de sensibilité, un scénario de référence doit être défini. Ce scénario de référence considère une évolution des variables d'entrée dite " fil de l'eau ", c'est-à-dire une évolution sans modifications importantes du système de transport et de son environnement socio-économique. Concernant les mesures de politiques de transport, le scénario *fil de l'eau* considère la mise en place des projets programmés de façon certaine. Concernant l'évolution du contexte socio-économique, il pose l'hypothèse d'un prolongement des tendances observées. Avant de procéder à l'analyse de la simulation de la situation au fil de l'eau une brève description de la situation à l'année de référence (1995) est proposée.

12. La situation à l'année de référence

121. Les masses de déplacements et les parts modales

En termes de parts de marché sur l'aire du schéma directeur, les déplacements en voiture particulière sont majoritaires. Ils représentent 64% de la masse totale des déplacements. Les déplacements en modes légers représentent 20% de la masse totale des déplacements, enfin les déplacements en transports collectifs représentent 16% du total.

Tableau 6-1. Nombre de déplacements par mode et parts de marché en 1995

	Nombre de déplacements	parts modales
Modes légers	844 326	20%
Voiture particulière	2 707 562	64%
Transports collectifs	653 059	16%
Total	4 204 946	100%

122. La répartition spatiale des déplacements

1221. La répartition spatiale des déplacements tous modes

La masse des déplacements se concentre sur la ville-centre (Lyon + Villeurbanne). Ce périmètre rassemble 33% du total des déplacements de l'aire d'étude. Les flux radiaux (entre le centre et la couronne de banlieue et entre le centre et la couronne périphérique) représentent 28% des déplacements totaux. Les déplacements transversaux (internes à la couronne de banlieue, internes à la couronne périphérique et entre la banlieue et la périphérie) représentent 39% des déplacements totaux.

Tableau 6-2. Nombre de déplacements tous modes par type de liaison géographique et structure spatiale en %

	Nombre de déplacements	<i>répartition spatiale</i>
Centre - Centre	1 390 369	33%
Centre - Banlieue	776 391	18%
Centre - Périphérie	392 809	9%
Banlieue - Banlieue	459 271	11%
Banlieue - Périphérie	502 271	12%
Périphérie - Périphérie	693 281	16%
Aire Totale	4 204 946	100%

1222. La répartition spatiale des déplacements en modes légers

Les déplacements en modes légers ne sont modélisés qu'à l'intérieur des zones (il s'agit en effet, rappelons le, de déplacements de proximité). Ils sont concentrés à la hauteur de

63% dans la ville-centre. Cette concentration s'explique par une densité urbaine relativement plus élevée sur cette aire, favorisant l'usage des modes légers, dans la mesure où les distances à parcourir sont relativement faibles. Les déplacements en modes légers internes à la couronne de banlieue ne représentent que 20% des déplacements réalisés par ce mode, et ceux internes à la couronne de périphérie ne représentent que 17%.

Tableau 6-3. Nombre de déplacements en modes légers par type de liaison géographique et structure spatiale en %

	Nombre de déplacements	<i>répartition spatiale</i>
Centre - Centre	531 233	63%
Banlieue - Banlieue	172 275	20%
Périphérie - Périphérie	140 818	17%
Aire Totale	844 326	100%

1223. La répartition spatiale des déplacements en transports collectifs

Les déplacements en transports collectifs se concentrent à l'intérieur de la ville-centre (41%). Sur cet espace, l'offre de transports en commun est relativement abondante et compétitive. Entre la ville-centre et la première couronne, les transports collectifs sont encore relativement bien représentés (25%) car l'offre de transports collectifs demeure pertinente dans la mesure où il peut y avoir massification des flux. Les déplacements en transports collectifs ne représentent plus que 11% entre le centre et la deuxième couronne. Sur cette liaison, les distances à parcourir associées aux faibles vitesses commerciales des transports collectifs rendent moins attractive l'offre en transports collectifs. Enfin, la part des déplacements en transports collectifs sur les autres liaisons tangentielles est faible. Sur ces liaisons, la diversité des trajectoires de déplacements et la densité relativement faible des espaces rendent l'offre de transports collectifs non adaptée aux besoins de déplacements.

Tableau 6-4. Nombre de déplacements en transports collectifs par type de liaison géographique et structure spatiale en %

	Nombre de déplacements	<i>répartition spatiale</i>
Centre - Centre	269 653	41%
Centre - Banlieue	162 118	25%
Centre - Périphérie	70 830	11%
Banlieue - Banlieue	46 095	7%
Banlieue - Périphérie	57 637	9%
Périphérie - Périphérie	46 725	7%
Aire Totale	653 059	100%

1224. La répartition spatiale des déplacements en voiture particulière

Les déplacements en voiture particulière, contrairement aux deux autres modes, ne se concentrent pas dans la ville-centre. Ainsi, ils ne représentent que 21% de la masse totale des déplacements en voiture particulière. Les déplacements en voiture particulière sur les liaisons radiales représentent 35% de la masse des déplacements en voiture particulière, et ils sont encore bien représentés sur les liaisons tangentiels.

Tableau 6-5. Nombre de déplacements en voiture particulière par type de liaison géographique et structure spatiale en %

	Nombre de déplacements	<i>répartition spatiale</i>
Centre - Centre	579 483	21%
Centre - Banlieue	614 273	23%
Centre - Périphérie	321 979	12%
Banlieue - Banlieue	240 901	9%
Banlieue - Périphérie	445 187	16%
Périphérie - Périphérie	505 738	19%
Aire Totale	2 707 562	100%

123. Les parts modales par type de liaison

Quel que soit le type de liaison considéré, la part des déplacements en voiture particulière est majoritaire. Cependant, la part des transports collectifs est non négligeable dans la ville-centre puisqu'elle représente 32% des déplacements motorisés. Sur la liaison radiale entre le centre et la première couronne, la part des transports collectifs conserve un niveau correct (21%). Sur les autres types de liaison, c'est la voiture particulière qui est largement dominante. Cette configuration est donc marquée par la présence de l'automobile en particulier sur les espaces périphériques et sur les liaisons tangentiels où elle règne en maître.

Tableau 6-6. Parts modales par type de liaison

	Modes légers	Transports collectifs	Voiture particulière	Total
Centre - Centre	38%	20%	42%	100%
Centre - Banlieue	0%	21%	79%	100%
Centre - Périphérie	0%	18%	82%	100%
Banlieue - Banlieue	38%	10%	52%	100%
Banlieue - Périphérie	0%	11%	89%	100%
Périphérie - Périphérie	20%	7%	73%	100%

124. Les distances parcourues

Les distances parcourues en voiture particulière sont mesurées par la distance parcourue par une unité de véhicule particulier (u.v.p.*km) en heure de pointe du matin (l'affectation est en effet réalisée sur cette tranche horaire).

Les flux en uvp.km dans la ville-centre représentent 16% des distances parcourues sur l'aire du SDAU. Ce sont les liaisons radiales lointaines (centre-périphérie) et les liaisons tangentiels qui sont les plus génératrices de kilomètres parcourus.

Tableau 6-7. Distances parcourues en uvp.km heure de pointe du matin

	uvp.km	répartition spatiale
Centre - Centre	256 476	16%
Centre - Banlieue	252 276	16%
Centre - Périphérie	301 152	19%
Banlieue - Banlieue	141 984	9%
Banlieue - Périphérie	357 482	22%
Périphérie - Périphérie	288 712	18%
Aire Totale	1 598 082	100%

13. La construction d'un scénario de référence " fil de l'eau "

Un scénario est une combinaison d'événements exogènes appelés à se produire à une période de temps donnée, correspondant à la durée de simulation du modèle. La construction d'un scénario dans le cadre de notre modèle consiste à poser des hypothèses d'évolution sur :

1.
Le développement urbain et la répartition spatiale des paramètres d'occupation des sols ;
2.
Le contexte socio-économique et notamment l'évolution de la variable "revenu des ménages" ;
3.
Les commandes du système à savoir l'évolution de l'offre de transport urbain et les différentes politiques mises en oeuvre afin de maîtriser l'évolution des déplacements urbains ;
4.
Les paramètres du modèle (cependant, par mesure de simplification, nous conserverons souvent les valeurs d'origine des paramètres).

Le scénario "fil de l'eau" constitue un scénario de référence. Il simule un prolongement des tendances observées en matière de croissance économique et urbaine et de réalisation des projets de transport (investissement, réglementation, etc.).

131. Les hypothèses scénariales

1311. Les hypothèses de l'évolution du développement urbain et de la structuration urbaine

a. Croissance des emplois basiques

La croissance des emplois basiques est calée sur le taux de croissance moyen annuel du PIB. Ce taux de croissance est fixé à 2,4%, ce qui correspond au taux de croissance moyen annuel du PIB observé sur la période 1970-1997.

b. Evolution de la population

En ce qui concerne l'évolution de la population totale, les hypothèses de croissance se calent sur l'évolution observée par les recensements généraux de la population de 1975, 1982, 1990 et 1999. Pour l'ensemble de l'aire d'étude, le taux de croissance moyen annuel observé entre 82 et 99 s'élève à 0,7% par an. Les taux de croissance observés pour chacune des zones de l'aire d'étude sont appliqués comme hypothèses de croissance de référence.

c. Evolution des emplois induits

L'évolution des emplois induits se fonde sur les tendances passées de l'évolution de l'emploi total sur chaque zone de l'aire d'étude. Les données d'emploi du RGP 99 n'étant pas disponibles, les tendances de référence sont celles observées sur la période 75-90.

1312. L'évolution du contexte socio-économique

On pose que le taux de croissance moyen annuel du revenu des ménages s'élève à 2,5% par an sur la période.

1313. L'évolution du système d'offre de transport

Le scénario de "fil de l'eau" prend en compte les projets en cours de réalisation et planifiés sur la période de simulation.

a. L'offre routière

Deux projets routiers sont pris en considération : la mise en place du tronçon nord du périphérique (déjà effective, il est payant sur une partie de son itinéraire), et la mise en place du tronçon Ouest du périphérique. Cet ouvrage est en projet.

b. L'offre en transports collectifs

Le PDU de l'agglomération lyonnaise a décidé de la mise en place de douze lignes fortes de transports collectifs. « D'ici 2005, l'effort financier sera consacré à améliorer le réseau de surface qui sera structuré ainsi : un ensemble de 12 lignes fortes formant avec le réseau de métro et le reste du réseau de surface, un maillage très performant au centre comme en périphérie, réseau qui répondra aux grands flux de déplacements quotidiens et de migrations alternantes ». Les lignes fortes ont été définies en fonction de la demande de déplacements telle qu'elle résulte de l'enquête ménage de 1995, ainsi que des données de l'INSEE sur les déplacements domicile-travail et l'analyse du réseau actuel.

Elles correspondent à des flux majeurs, auxquelles la réponse est aujourd'hui médiocrement assurée et qui concernent des liaisons où les transports collectifs peuvent accroître leur part de marché si l'offre est de qualité. Dans le PDU, les lignes fortes ont deux vocations :

1.

Relier les principaux pôles de la périphérie (première, voire deuxième couronne) à l'un des deux centres de l'agglomération (Part-Dieu et Presqu'île) perçant ainsi la ceinture de congestion. Les lignes fortes répondent ainsi à l'enjeu principal de l'accroissement de la part des transports publics, qui porte essentiellement sur les liaisons avec la périphérie.

2.

Relier entre eux ces pôles périphériques lorsque le nombre de déplacements est suffisamment important pour justifier d'une desserte performante en rocade.

Elles doivent avoir un niveau de service élevé : amplitude horaire très large, fréquence de 5 à 10 minutes, régularité du temps de parcours, etc. Pour la réalisation des lignes fortes et l'amélioration de l'accessibilité de l'agglomération, la priorité sur les lignes reliant la ville-centre et les pôles universitaires de la Doua et de Bron a été donnée. Ces lignes ont été réalisées avec la technologie de site propre intermédiaire : le tramway. Les autres lignes sont en cours d'étude ou en projet d'étude. Dans la définition du scénario "fil de l'eau", seules ces deux lignes fortes en cours de réalisation sont intégrées avec la technologie tramway.

Un autre projet d'investissement massif est également pris en considération : le prolongement de la ligne B du métro jusqu'à Gerland⁴², ce qui représente la mise en service de trois stations de métro supplémentaires.

1314. Les paramètres

On suppose que chaque paramètre conserve sa valeur d'origine dans le modèle.

132. Les effets sur le système de déplacements urbains à l'horizon 2020 pour la simulation fil de l'eau

1321. L'évolution des masses de déplacements et des parts modales

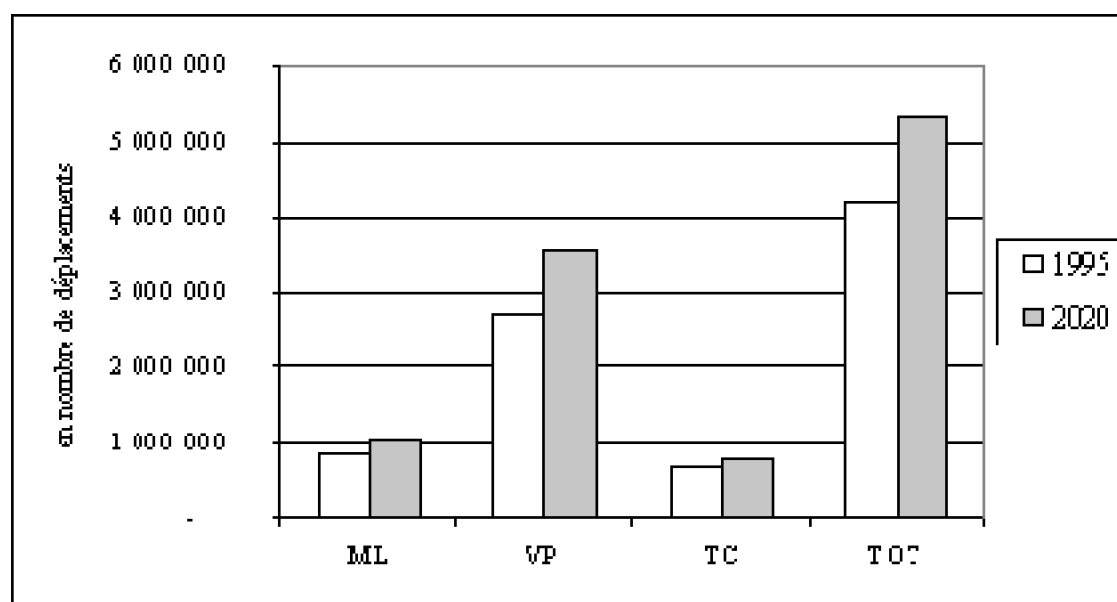
En 25 ans, la masse totale des déplacements sur l'agglomération s'accroît de 27%, ce qui correspond à un taux de croissance moyen annuel de 0,96% par an. Cette croissance bénéficie surtout aux déplacements en voiture particulière qui observent une augmentation de 31%. Les déplacements en modes légers augmentent de 23%, et enfin, le parent pauvre de la croissance est les déplacements en transports collectifs (ils augmentent seulement de 17%). En termes de parts de marché, la voiture particulière gagne 2 points passant de 64% à 66%. Les transports collectifs perdent 2 points de part

⁴² L'ouverture commerciale du prolongement de la ligne B à Gerland a été effectuée en septembre 2000.

de marché malgré la mise en place des deux lignes de tramways.

Tableau 6-8. Evolution du nombre de déplacements par mode et des parts de marché par rapport à 1995

	1995	%	2020	%	croissance	écart des parts modales
Modes légers	844 326	20%	1 041 672	20%	23%	0%
Voiture particulière	2 707 562	64%	3 535 830	66%	31%	2%
Transports collectifs	653 059	16%	761 989	14%	17%	-2%
Total	4 204 946	100%	5 339 491	100%	27%	0%



Graphique 6-. Evolution du nombre de déplacements par mode dans la simulation fil de l'eau

1322. L'évolution de la répartition spatiale des déplacements

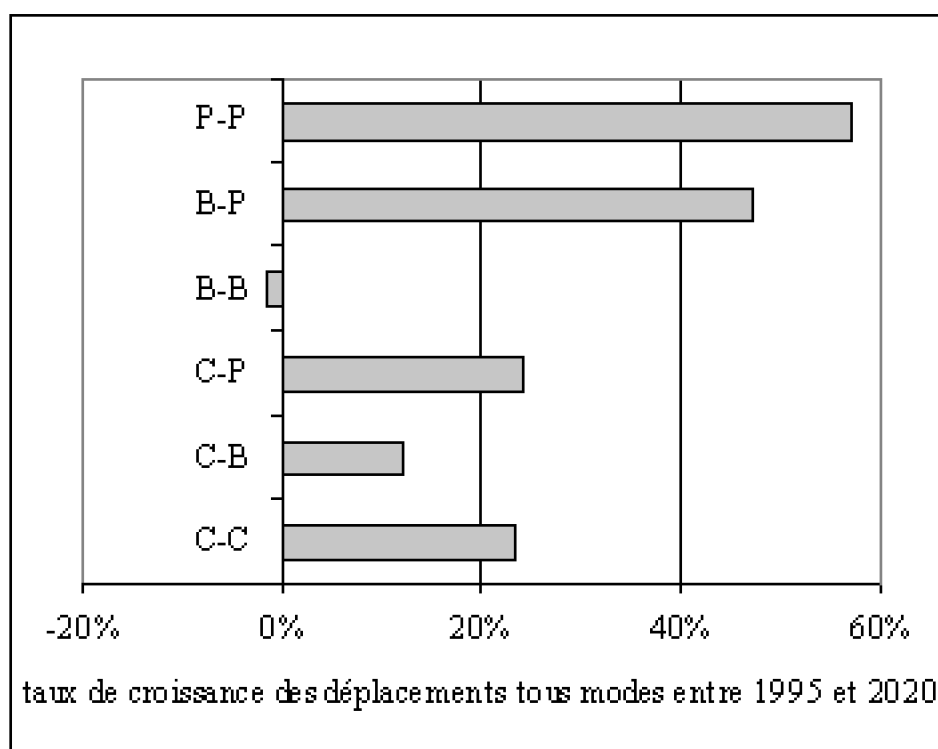
a. L'évolution de la répartition spatiale des déplacements tous modes

Le nombre de déplacements tous modes progresse sur la liaison banlieue-périphérie (+47%) et entre les zones de la couronne périphérique (+57%). Les déplacements internes à la ville-centre et se réalisant entre la ville-centre et la périphérie progressent au même rythme de croissance, à savoir respectivement 23% et 24%. Entre la ville-centre et la banlieue, ils augmentent de 12%. Enfin, on constate une décroissance des déplacements internes à la banlieue. Au total, la croissance profite relativement mieux aux déplacements transversaux. On observe ainsi une légère redistribution spatiale des flux

qui se réalise au détriment des déplacements internes à la ville-centre et des déplacements radiaux, et qui bénéficie fortement aux déplacements transversaux.

Tableau 6-9. Evolution du nombre de déplacements tous modes par type de liaison géographique et de la structure spatiale des déplacements tous modes par rapport à 1995.

	1995	%	2020	%	croissance 1995-2020	écart de répartition spatiale
Centre - Centre	1 380 369	33%	1 700 834	32%	23%	-1%
Centre - Banlieue	1 716 391	18%	870 294	16%	12%	-2%
Centre - Périphérie	362 809	9%	487 587	9%	24%	0%
Banlieue - Banlieue	450 271	11%	452 700	8%	-1%	-2%
Banlieue - Périphérie	502 825	12%	740 054	14%	47%	2%
Périphérie - Périphérie	688 281	16%	1 088 022	20%	57%	4%
Aire Totale	4 204 946	100%	5 339 491	100%	27%	0%



Graphique 6-. Evolution différentielle de la répartition spatiale des déplacements tous modes par rapport à 1995

b. La répartition spatiale des déplacements en modes légers

Ce sont les déplacements internes à la ville-centre et ceux internes à la périphérie qui augmentent (respectivement +34% et +35%) ; les flux internes à la couronne de banlieue diminuent de 18%.

Tableau 6-10. Evolution du nombre de déplacements en modes légers par type de liaison géographique et évolution de la structure spatiale des déplacements en modes légers par rapport à 1995.

	1995	%	2020	%	croissance	écart de répartition spatiale
Centre - Centre	531 233	63%	710 704	68%	34%	5%
Banlieue - Banlieue	172 275	20%	141 294	14%	-18%	-7%
Périphérie - Périphérie	140 818	17%	189 675	18%	35%	2%
Aire Totale	844 326	100%	1 041 672	100%	23%	0%

c. La répartition spatiale des déplacements en transports collectifs

Les déplacements réalisés en transports collectifs augmentent fortement dans les zones périphériques (+36% entre la banlieue et la périphérie et +46% entre les zones de la couronne de la périphérie). A l'intérieur de la ville-centre, ces déplacements progressent de 19%. Ils restent très majoritaires et représentent 42% des déplacements réalisés en transports collectifs sur l'agglomération. La croissance des déplacements en transports collectifs sur les liaisons radiales est moindre, et on constate une diminution de ces déplacements sur les liaisons internes aux banlieues.

Tableau 6-11. Evolution du nombre de déplacements en transports collectifs par type de liaison géographique et évolution de la structure spatiale des déplacements tous modes par rapport à 1995.

	1995	%	2020	%	croissance 1995-2020	écart des parts
Centre - Centre	269 653	41%	320 130	42%	19%	1%
Centre - Banlieue	162 118	25%	167 899	22%	4%	-3%
Centre - Périphérie	76 880	11%	81 856	11%	16%	0%
Banlieue - Banlieue	46 095	7%	45 532	6%	-1%	-1%
Banlieue - Périphérie	57 637	9%	78 247	10%	36%	1%
Périphérie - Périphérie	46 725	7%	68 324	9%	46%	2%
Aire Totale	653 059	100%	791 989	100%	17%	0%

d. La répartition spatiale des déplacements en voiture particulière

L'augmentation du nombre de déplacements en voiture particulière se fait surtout ressentir, encore une fois, dans les zones périphériques : 49% d'augmentation sur les échanges banlieue-périphérie et 64% sur les échanges entre zones périphériques. Ils augmentent dans une moindre mesure sur l'échange entre le centre et la périphérie (+26%). Ces déplacements sont en augmentation sur les autres liaisons mais de façon nettement moins prononcée.

Lorsque l'on compare la répartition des flux sur les différents types de liaisons entre 1995 et la projection fil de l'eau 2020, on observe une certaine modification de la

distribution géographique des déplacements en voiture particulière : les liaisons internes à la ville-centre, les liaisons internes à la couronne de banlieue, et les liaisons radiales perdent du poids au profit des liaisons périphériques.

Tableau 6-12. Evolution du nombre de déplacements en voiture particulière par type de liaison géographique et évolution de la structure spatiale des déplacements en voiture particulière par rapport à 1995.

	1995	%	2020	%	croissance	écart des parts
Centre - Centre	579 483	21%	670 001	19%	16%	-2%
Centre - Banlieue	614 273	23%	702 395	20%	14%	-3%
Centre - Périphérie	321 079	12%	405 731	11%	26%	0%
Banlieue - Banlieue	240 801	9%	265 874	8%	10%	-1%
Banlieue - Périphérie	415 187	16%	661 807	19%	49%	2%
Périphérie - Périphérie	505 738	19%	830 022	23%	64%	5%
Aire Totale	2 707 562	100%	3 535 830	100%	31%	0%

L'évolution de la répartition géographique des déplacements est fortement conditionnée par l'évolution des formes urbaines. Dans la simulation fil de l'eau, les hypothèses posées quant à l'évolution des formes urbaines conduisent à une croissance plus forte des zones périphériques⁴³.

Tableau 6-13. Evolution des paramètres d'occupations des sols entre 1995 et 2020.

	emplois induits	emplois totaux	population totale	population active
Centre	6%	47%	16%	12%
Banlieue	22%	55%	4%	-7%
Périphérie	48%	68%	40%	40%
Grand périurbain	19%	58%	38%	39%
Total	19%	55%	27%	24%

La croissance de la population totale, celle de la population active et celle des emplois induits se réalisent essentiellement sur les zones périphériques (respectivement +40%, +40% et +48%). Le grand périurbain bénéficie également d'une croissance relativement soutenue de la population totale (+38%) et de la population active (+39%) et dans une moindre mesure des emplois induits (+19%). La ville-centre bénéficie d'une légère croissance (+16% pour la population totale, +12% pour la population active, +6% pour les emplois induits). Enfin, la banlieue connaît une évolution nettement moins favorable que le reste (+4% pour la population totale, -7% pour la population active et +22% pour les emplois induits). Cette configuration explique ainsi la forte progression des déplacements dans les zones périphériques, et la faible progression dans les zones de banlieue.

⁴³ Nous rappelons que la progression des emplois basiques n'est pas spatialisée, ainsi elle se réalise de façon uniforme sur l'ensemble de l'aire d'étude.

1323. L'évolution des parts modales par type de liaison

Les modes légers gagnent 4 points de parts de marché dans la ville-centre mais en perdent 6 sur les liaisons internes aux zones de banlieue et 3 sur les liaisons internes aux zones de périphérie. Cela peut s'expliquer par une relative redensification de la ville-centre, et une dédensification de la banlieue.

Les transports collectifs stabilisent leurs parts de marché sur les liaisons internes à la ville-centre, internes à la banlieue et entre la banlieue et la périphérie. En revanche, ils perdent des parts de marché sur les liaisons radiales centre-banlieue (-2 points) et centre-périphérie (-1 point) et entre les zones périphériques (-1 point).

Tableau 6-14. Evolution des parts modales par type de liaison entre 1995 et 2020

	Modes légers	Transports collectifs	Voiture particulière
Centre - Centre	+4	=	-3
Centre - Banlieue	-	-2	+3
Centre - Périphérie	-	-1	=
Banlieue - Banlieue	-6	=	+8
Banlieue - Périphérie	-	=	+2
Périphérie - Périphérie	-3	-1	+4

La voiture particulière perd 3 points de part de marché sur la ville-centre. Ceci peut être expliqué en partie par le phénomène de redensification de la ville-centre mais surtout par la dégradation des conditions de circulation dans cette zone. En effet, l'évolution comparée des temps de parcours donne les résultats suivants :

Tableau 6-15. Evolution des temps généralisés en voiture particulière et en transports collectifs entre 1995 et 2020 (en minutes)

	temps généralisés en voiture particulière			temps généralisés en transports collectifs		
	1995	2020	<i>Ecart</i>	1995	2020	<i>Ecart</i>
Centre → Centre	18,3	30,9	12,6	30,9	28,3	-2,5
Centre → Banlieue	14,7	15,9	1,2	38,2	36,2	-2,1
Centre → Périphérie	20,9	21,4	0,5	64,2	59,0	-5,2
Banlieue → Centre	22,0	29,0	7,0	38,7	35,3	-3,4
Banlieue → Banlieue	12,6	19,1	6,5	38,8	38,7	-0,1
Banlieue → Périphérie	15,4	14,7	-0,7	57,3	52,9	-4,4
Périphérie → Centre	30,9	40,2	9,3	58,6	55,2	-3,3
Périphérie → Banlieue	17,5	21,3	3,8	55,3	52,2	-3,0
Périphérie → Périphérie	11,2	17,3	6,1	55,2	55,6	0,4

De façon générale, les temps généralisés en voiture particulière se dégradent sur l'ensemble des liaisons. *A contrario*, les temps généralisés en transports collectifs s'améliorent. Un examen de la progression du ratio des temps généralisés en transports collectifs sur les temps généralisés en voiture particulière permet d'approfondir l'analyse.

Tableau 6-16. Evolution du ratio des temps généralisés TC/VP entre 1995 et 2020.

	1995	2020	<i>Ecart</i>
Centre → Centre	1,7	0,9	-0,8
Centre → Banlieue	2,6	2,3	-0,3
Centre → Périphérie	3,1	2,8	-0,3
Banlieue → Centre	1,8	1,2	-0,5
Banlieue → Banlieue	3,1	2,0	-1,0
Banlieue → Périphérie	3,7	3,6	-0,1
Périphérie → Centre	1,9	1,4	-0,5
Périphérie → Banlieue	3,2	2,5	-0,7
Périphérie → Périphérie	4,9	3,2	-1,7

Le ratio des temps généralisés TC/VP sur la ville-centre s'améliore fortement. Il est toujours plus favorable à la voiture particulière mais les conditions de circulation en voiture particulière se dégradent. La voiture particulière gagne des parts de marché sur la liaison

centre-banlieue, sur cette liaison, la dégradation des temps généralisés en voiture particulière est en effet moindre, et le ratio TC/VP est nettement favorable à la voiture particulière.

1324. L'évolution des distances parcourues

Les distances parcourues en voiture particulière augmentent de 25% en 25 ans. Cette progression se porte essentiellement sur les liaisons entre zones périphériques (+69%) et sur la liaison Centre - Banlieue (+39%). Cette progression n'est pas surprenante dans la mesure où l'évolution du nombre de déplacements est quasi équivalente. Ce qui est plus surprenant est la diminution des distances parcourues sur les liaisons internes à la couronne de banlieue alors que sur ces mêmes liaisons le nombre de déplacements en voiture particulière augmente globalement. Cela traduit une redistribution spatiale des déplacements dans ce secteur qui s'orientent vers davantage de proximité.

Tableau 6-17. Evolution des distances parcourues en uvp.km en heure de pointe du matin

	1995	2020	taux de croissance
Centre - Centre	256 476	275 359	7%
Centre - Banlieue	252 276	253 514	0%
Centre - Périphérie	301 152	345 970	15%
Banlieue - Banlieue	141 984	141 267	-1%
Banlieue - Périphérie	357 482	498 359	39%
Périphérie - Périphérie	288 712	488 166	69%
Aire totale	1 598 082	2 002 635	25%

Section 2. La sensibilité des résultats du modèle à quelques variables d'entrée

Différents tests de sensibilité à certaines variables clés du modèle sont proposées. Les variables d'entrée concernées sont le taux de croissance du revenu et l'élasticité de la motorisation au revenu.

21. La sensibilité du modèle à la variable revenu

La variable de taux de croissance de revenu intervient à deux niveaux dans le modèle. Dans un premier temps, elle conditionne l'évolution du taux de mobilité quotidienne et donc celle du nombre total de déplacements. Dans un deuxième temps, elle intervient sur l'évolution du taux de motorisation par l'intermédiaire d'une élasticité du taux de motorisation au revenu. Par ce biais, et à travers la variable du taux de motorisation, le taux de croissance du revenu intervient indirectement dans le modèle à plusieurs niveaux : sur la distribution spatiale des déplacements dans la mesure où le taux de motorisation est corrélé aux facteurs de conductance des modèles de distribution ; sur la répartition modale des déplacements entre les modes légers et les autres modes ; enfin, sur la répartition modale des déplacements entre la voiture particulière et les transports

collectifs. Quatre tests de sensibilité sont envisagés : les deux premiers posent des hypothèses de croissance du revenu inférieures à celles retenues dans la simulation fil de l'eau, les deux suivants posent des hypothèses de croissance du revenu supérieures. En ce qui concerne le reste des variables d'entrée, l'hypothèse de travail « toutes choses égales par ailleurs » par rapport à la simulation fil de l'eau est posée.

211. Les hypothèses basses de croissance du revenu des ménages

Deux simulations reposant sur des hypothèses différenciées de taux de croissance du revenu sont testées : une hypothèse de croissance du revenu des ménages à un taux moyen annuel de 0,5% (nommée dans les commentaires qui suivent *hypothèse 0,5%*) et une hypothèse de croissance du revenu des ménages à un taux moyen annuel de 1,5% (nommée *hypothèse 1,5%*).

2111. L'évolution des masses de déplacements et des parts modales

Les simulations en *hypothèse 0,5%* et en *hypothèse 1,5%* conduisent respectivement à une progression du nombre de déplacements par rapport à 1995 de 21% et de 24%. La simulation en *hypothèse 0,5%* permet une progression de nombre de déplacements plus favorable aux transports collectifs (+29%) et aux modes légers (+26%), et une progression moindre des déplacements en voiture particulière (+17%).

Tableau 6-18. Evolution du nombre de déplacements par mode entre 1995 et 2020 en hypothèses basses du revenu

	1995	2020 hypothèse 0,5%	taux de croissance	2020 hypothèse 1,5%	taux de croissance
Modes légers	844 326	1 062 262	26%	1 034 254	22%
Voiture particulière	2 707 562	3 168 717	17%	3 370 053	24%
Transports collectifs	653 059	842 440	29%	802 803	23%
Total	4 204 946	5 073 418	21%	5 207 110	24%

En termes de parts de marché, cela se traduit par une progression de 1 point de la part de marché des modes légers et également des transports collectifs. En revanche, la voiture particulière perd 2 points de parts de marché. Elle passe de 64% à 62%, et reste donc malgré tout très majoritaire. La simulation en *hypothèse 1,5%* aboutit à une progression quasi-équivalente des modes légers (+22%), de la voiture particulière (+24%) et des transports collectifs (+23%). En termes de part de marché, on observe une situation inversée par rapport à la simulation en *hypothèse 0,5%*, à savoir une perte de part de marché de 1 point respectivement pour les modes légers et les transports collectifs et un gain de 2 points pour la voiture particulière.

Tableau 6-19. Evolution des parts de marché des modes de transport entre 1995 et 2020

	1995	2020 hypothèse 0,5%	écart 2020-1995	2020 hypothèse 1,5%	écart 2020-1995
Modes légers	20%	21%	1%	20%	-1%
Voiture particulière	64%	62%	-2%	65%	2%
Transports collectifs	16%	17%	1%	15%	-1%
Total	100%	100%	0%	100%	0%

Par rapport à la simulation *fil de l'eau* 2020, la simulation en *hypothèse 0,5%* fait observer un écart du nombre total de déplacements de -5%. On observe une augmentation des déplacements en transports collectifs supérieure de 11% à celle observée en simulation *fil de l'eau*, une progression légèrement supérieure du nombre de déplacements en modes légers, et par contre une progression du nombre de voiture particulière inférieure de 10% à celle observée pour le *fil de l'eau*. En ce qui concerne la simulation *hypothèse 1,5%*, la progression du nombre total de déplacements est inférieure de 2% à celle observée en simulation *fil de l'eau*. En termes de répartition modale, le phénomène est le même que pour *l'hypothèse 0,5%*, les écarts étant cependant moins accentués.

Tableau 6-20. Croissance différentielle du nombre de déplacements par mode par rapport à la simulation *fil de l'eau* 2020

	2020 Fil eau	2020 hypothèse 0,5%	différentiel de croissance	2020 hypothèse 1,5%	différentiel de croissance
Modes légers	1 041 672	1 062 262	2%	1 034 245	-1%
Voiture particulière	3 535 830	3 168 717	-10%	3 370 053	-5%
Transports collectifs	761 989	842 440	11%	802 803	5%
Total	5 339 491	5 073 418	-5%	5 207 110	-2%

Tableau 6-21. Croissance différentielle des parts de marché par mode par rapport à la simulation *fil de l'eau* 2020

	2020 Fil eau	2020 hypothèse 0,5%	différentiel de croissance	2020 hypothèse 1,5%	différentiel de croissance
Modes légers	20%	21%	1%	20%	-0%
Voiture particulière	66%	62%	-4%	65%	-2%
Transports collectifs	14%	17%	2%	15%	1%
Total	100%	100%	0%	100%	0%

2112. L'évolution de la répartition spatiale des déplacements

Les mêmes tendances d'évolution de la répartition spatiale des déplacements sont observées, cependant moins accentuées, que celles de la simulation *fil de l'eau*. Cela s'explique par le fait que les hypothèses sur les facteurs conditionnant la répartition spatiale des déplacements, à savoir les tendances d'urbanisation et les projets de transport sont identiques à celles du fil de l'eau.

2113. L'évolution des parts modales par type de liaison

Pour la simulation *hypothèse 0,5%*, les modes légers gagnent, en centre-ville, 8 points de parts de marché au détriment de la voiture particulière par rapport à 1995. En revanche, ils perdent 4 points de parts de marché les liaisons internes aux zones de banlieue, et 1 point sur les liaisons internes aux zones de périphérie. Les transports collectifs gagnent des parts de marché sur toutes les liaisons. *A contrario*, la voiture particulière perd des parts de marché pratiquement sur toutes les liaisons sauf celles internes à la banlieue. Des déformations similaires, mais moins prononcées, sont constatées lorsque le taux de croissance du revenu est posé à 1,5% par an.

Tableau 6-22. Evolution des parts de marché par type de liaison géographique par rapport à 1995

	hypothèse 0,5%			hypothèse 1,5%		
	ML	TC	VP	ML	TC	VP
Centre - Centre	+8	+1	-8	+6	+1	-5
Centre - Banlieue		+2	-2		=	=
Centre - Périphérie		+2	-2		=	=
Banlieue - Banlieue		+3	+1	-6	+2	+4
Banlieue - Périphérie		+2	-2		+1	+1
Périphérie - Périphérie		+1	=	-2	=	-2

Des remarques similaires peuvent être faites lorsque l'on compare les résultats des simulations *hypothèse 0,5%* et *hypothèse 1,5%* à la simulation fil de l'eau à l'horizon 2020.

Tableau 6-23. Evolution des parts de marché par type de liaison géographique par rapport à la simulation fil

de l'eau 2020

	hypothèse 0,5%			hypothèse 1,5%		
	ML	TC	VP	ML	TC	VP
Centre - Centre	-4	+1	-5	+2	+1	-2
Centre - Banlieue		+4	-4		+2	-2
Centre - Périphérie		+3	-3		+1	-1
Banlieue - Banlieue	+2	+3	-5	=	+2	-2
Banlieue - Périphérie		+2	-2		+1	-1
Périphérie - Périphérie	+2	+2	-3	+1	+1	-1

2114. L'évolution des distances parcourues par rapport au fil de l'eau

Les distances parcourues en simulations *hypothèse 0,5%* et *hypothèse 1,5%* sont inférieures à celles observées pour la simulation *fil de l'eau* (respectivement de -6% et de -4%). En *hypothèse 1,5%*, les distances parcourues à l'intérieur de la couronne de banlieue sont plus importantes que celles observées en simulation *fil de l'eau* alors que le nombre de déplacements sur cette liaison est moins élevé en simulation *hypothèse 1,5%* qu'en simulation *fil de l'eau*. Cela traduit une redistribution spatiale des déplacements à l'intérieur de cette couronne.

Tableau 6-24. Croissance différentielle des distances parcourues en uvp.km en heure de pointe du matin par rapport à la simulation fil de l'eau

	Fil eau	hypothèse 0,5%	écart de croissance	hypothèse 1,5%	écart de croissance
Centre - Centre	275 359	237 815	-14%	257 618	-6%
Centre - Banlieue	253 514	234 835	-7%	246 867	-3%
Centre - Périphérie	315 970	336 153	-3%	349 214	1%
Banlieue - Banlieue	144 267	137 081	-3%	145 495	3%
Banlieue - Périphérie	401 359	483 976	-3%	498 805	0%
Périphérie - Périphérie	408 166	450 482	-8%	469 084	-4%
Aire totale	2 002 635	1 880 342	-6%	1 967 083	-2%

2115. L'évolution des conditions d'accessibilité

Les résultats des simulations reposant sur des hypothèses basses du revenu (*hypothèse 0,5%* et *hypothèse 1,5%*) montrent une amélioration des conditions d'accessibilité des résidents aux emplois et des emplois induits à la population résidente. Cela s'explique par une moindre progression du nombre de déplacements en voiture particulière, et donc un encombrement plus faible de la voirie. Ces modifications d'accessibilité n'ont que peu d'impacts sur la répartition spatiale des résidents et des activités. La structure urbaine ne subit en effet qu'une modification très marginale.

212. Les hypothèses hautes de croissance du revenu des ménages

Deux simulations reposant sur des hypothèses différenciées de taux de croissance du revenu sont testées : une hypothèse de croissance du revenu des ménages à un taux moyen annuel de 3,5% (nommée dans les commentaires qui suivent *hypothèse 3,5%*) et une hypothèse de croissance du revenu des ménages à un taux moyen annuel de 4,5% (nommée *hypothèse 4,5%*).

2121. L'évolution des masses de déplacements et des parts modales

Le nombre total de déplacements en simulation *hypothèse 3,5%* augmente de 30% par rapport à 1995, et en simulation *hypothèse 4,5%* de 33%. L'augmentation se porte sur l'ensemble des modes mais plus favorablement sur la voiture particulière (+36% en simulation *hypothèse 3,5%* et +42% en simulation *hypothèse 4,5%*).

Tableau 6-25. Evolution du nombre de déplacements par mode par rapport à 1995

	1995	2020 hypothèse 3,5%	taux de croissance	2020 hypothèse 4,5%	taux de croissance
Modes légers	844 326	1 039 546	23%	1 047 927	24%
Voiture particulière	2 707 562	3 695 695	36%	3 832 389	42%
Transports collectifs	653 059	735 346	13%	720 106	10%
Total	4 204 946	5 470 587	30%	5 600 422	33%

En termes de parts de marché, la voiture particulière gagne respectivement 3 points dans la simulation en *hypothèse 3,5%* et 4 points dans la simulation en *hypothèse 4,5%*. Dans les deux cas, les modes légers perdent 1 point de part de marché et les transports collectifs perdent respectivement 2 points pour la simulation *hypothèse 3,5%* et 3 points pour la simulation *hypothèse 4,5%*.

Tableau 6-26. Evolution des parts de marché par mode par rapport à 1995

	1995	2020 hypothèse 3,5%	écart 2020-1995	2020 hypothèse 4,5%	écart 2020-1995
Modes légers	20%	19%	-1%	19%	-1%
Voiture particulière	64%	68%	3%	68%	+4%
Transports collectifs	16%	13%	-2%	13%	-3%
Total	100%	100%	0%	100%	0%

Le nombre total de déplacements dans la simulation *hypothèse 3,5%* est supérieur

de 2% à celui observé dans la simulation *fil de l'eau*, et il est supérieur de 5% pour la simulation *hypothèse 4,5%*. Le différentiel de croissance se porte sur les déplacements en voiture particulière (un taux de croissance supérieur de 5% pour la simulation *hypothèse 3,5%* et un taux de croissance supérieur de 8% pour la simulation *hypothèse 4,5%*). En revanche, la progression du nombre de déplacements effectués en transports collectifs est moindre que pour la simulation *fil de l'eau* (un écart de -2% pour la simulation en *hypothèse 3,5%* et un écart de -5% pour la simulation *hypothèse 4,5%*). En ce qui concerne la progression des déplacements en modes légers, elle est quasiment identique à celle observée en simulation *fil de l'eau*.

Tableau 6-27. Croissance différentielle du nombre de déplacements par mode par rapport à la simulation *fil de l'eau*

	2020 Fil eau	2020 hypothèse 3,5%	différentiel de croissance	2020 hypothèse 4,5%	différentiel de croissance
Modes légers	1 041 672	1 039 546	0%	1 047 927	1%
Voiture particulière	3 535 830	3 695 695	5%	3 832 389	8%
Transports collectifs	761 989	735 346	-3%	720 106	-5%
Total	5 339 491	5 470 587	2%	5 600 422	5%

En parts de marché, les tendances précédentes sont aggravées : seule la voiture particulière augmente ses parts de marché, celles des deux autres modes déclinent.

Tableau 6-28. Croissance différentielle des parts de marché par mode par rapport à la simulation *fil de l'eau*

	2020 Fil eau	2020 hypothèse 3,5%	différentiel de croissance	2020 hypothèse 4,5%	différentiel de croissance
Modes légers	20%	19%	-1%	19%	-1%
Voiture particulière	66%	68%	1%	68%	2%
Transports collectifs	14%	13%	-1%	13%	-1%
Total	100%	100%	0%	100%	0%

2122. L'évolution de la répartition spatiale des déplacements

L'évolution de la répartition spatiale des déplacements suit les mêmes tendances que celles observées en simulation *fil de l'eau*.

2123. Les parts modales par type de liaison

Sur la période de simulation (1995-2020), en *hypothèse 3,5%*, les modes légers gagnent

1 point de part de marché sur les déplacements effectués dans la ville-centre, ils en perdent 6 à l'intérieur de la couronne de banlieue et 2 à l'intérieur de la couronne de périphérie. En *hypothèse 4,5%*, les modes légers perdent 1 point de part de marché sur la ville-centre, pour les autres secteurs, la situation est identique à la simulation *hypothèse 3,5%*.

Dans les deux hypothèses, les transports collectifs perdent des parts de marché. *A contrario*, dans les deux hypothèses, la voiture particulière gagne des parts de marché, en particulier sur les liaisons internes à la couronne de banlieue et sur les liaisons radiales.

Tableau 6-29. Evolution des parts modales par type de liaison géographique par rapport à 1995

	hypothèse 3,5%			hypothèse 4,5%		
	ML	TC	VP	ML	TC	VP
Centre - Centre	-1	-1	+1	-1	-2	+4
Centre - Banlieue	-3	-3	+3		-4	+4
Centre - Périphérie	-2	-2	+2		-2	+2
Banlieue - Banlieue	-1	-1	+7	-6	-2	+7
Banlieue - Périphérie	-1	-1	+1		-1	+1
Périphérie - Périphérie	-1	-1	+3	-2	-1	+3

Lorsque l'on compare les résultats des simulations à ceux obtenus en simulation *fil de l'eau*, on observe que la part des modes légers sur la ville-centre est inférieure de 3 points à celle observée en simulation *fil de l'eau* en *hypothèse 3,5%*, et inférieure de 5 points en *hypothèse 4,5%*.

Les parts de marché des transports collectifs sont inférieures à celles observées dans la simulation *fil de l'eau* pour toutes les liaisons. En revanche, les parts de marché de la voiture particulière sont supérieures à celles de la simulation *fil de l'eau* pour toutes les liaisons et en particulier pour la ville-centre.

Tableau 6-30. Evolution différentielle des parts modales par type de liaison géographique par rapport à la simulation *fil de l'eau*

	hypothèse 3,5%			hypothèse 4,5%		
	ML	TC	VP	ML	TC	VP
Centre - Centre	-3	-1	+4	-5	-2	+7
Centre - Banlieue	-1	-1	+1		-2	+2
Centre - Périphérie	-1	-1	+1		-1	+1
Banlieue - Banlieue	-1	-1	+1	=	-2	+1
Banlieue - Périphérie	-1	-1	+1		-1	+1
Périphérie - Périphérie	=	=	=	+1	=	=

2124. L'évolution des distances parcourues

Sur l'aire d'étude, les distances parcourues en voiture particulière ne progressent pas ou pratiquement pas par rapport aux résultats de la simulation *fil de l'eau*. Globalement,

l'élévation du taux de croissance du revenu a peu d'effets sur l'évolution des distances parcourues. Néanmoins, des évolutions différenciées s'observent sur chacune des liaisons géographiques. Ainsi, par rapport à la *simulation fil de l'eau*, les distances parcourues augmentent davantage sur les liaisons internes à la ville-centre et sur la liaison radiale Centre - Banlieue. Elles diminuent sur les autres types de liaisons.

Tableau 6-31. Evolution différentielle des distances parcourues en uvp.km en heure de pointe du matin

	Fil eau	hypothèse 3,5%	écart de croissance	hypothèse 4,5%	écart de croissance
Centre - Centre	275 359	302 714	10%	320 786	16%
Centre - Banlieue	253 514	256 891	1%	262 647	4%
Centre - Périphérie	345 970	344 248	0%	342 146	-1%
Banlieue - Banlieue	144 267	134 494	-5%	135 357	-4%
Banlieue - Périphérie	406 359	490 009	-2%	479 261	-4%
Périphérie - Périphérie	488 166	479 214	-2%	474 386	-3%
Aire totale	2 002 635	2 007 569	0%	2 014 582	1%

213. La comparaison des résultats des tests de sensibilité à la variable revenu

2131. L'évolution comparée des masses de déplacements et des parts modales

Le modèle est sensible à la variation du taux de croissance du revenu. Par construction, le taux de croissance du revenu a un impact direct sur le taux de mobilité quotidienne, et donc sur la masse de déplacements tous modes.

La modélisation en *hypothèse 0,5%* permet une croissance de la masse totale des déplacements de 21%, la simulation en *hypothèse 1,5%* de 24%, la simulation en *hypothèse 2,5%* (fil de l'eau) de 27%, la simulation en *hypothèse 3,5%* de 30% et la simulation en *hypothèse 4,5%* de 33%. Ainsi, un écart de 1 point de croissance du revenu induit un écart de 3 points de croissance de la masse totale des déplacements.

Tableau 6-32. Evolution comparée du nombre de déplacements par mode par rapport à 1995

	hypothèse 0,5%	hypothèse 1,5%	fil de l'eau 2,5%	hypothèse 3,5%	hypothèse 4,5%
Modes légers	26%	22%	23%	23%	24%
Voiture particulière	17%	24%	31%	36%	42%
Transports collectifs	29%	23%	17%	13%	10%
Total	21%	24%	27%	30%	33%

En termes de répartition modale, la variation du taux de croissance du revenu a également des répercussions notables. Cela s'explique par la relation taux de motorisation - revenu exprimée dans le modèle. Le taux de croissance du revenu a un effet indirect sur le partage modal à travers le taux de motorisation. La variable taux de motorisation intervient en effet dans la fonction de partage modal entre les modes légers et les autres modes. Une élévation du taux de motorisation a comme effet de défavoriser l'usage des modes légers. La variable taux de motorisation intervient également dans la fonction de partage modal entre la voiture particulière et les transports collectifs. Une élévation du taux de motorisation a un impact négatif sur la proportion de déplacements réalisés en transports collectifs sur une liaison donnée.

Ainsi, les résultats des simulations font apparaître que l'élévation du taux de croissance du revenu a un effet favorable sur l'usage de la voiture particulière au détriment des modes légers et de manière plus prononcée au détriment des transports collectifs.

Tableau 6-33. Evolution comparée des parts de marché par mode par rapport à 1995

	hypothèse 0,5%	hypothèse 1,5%	fil de l'eau 2,5%	hypothèse 3,5%	hypothèse 4,5%
Modes légers	0,9%	-0,2%	-0,6%	-1,1%	-1,4%
Voiture particulière	-1,9%	0,3%	1,8%	3,2%	4,0%
Transports collectifs	1,1%	-0,1%	-1,3%	-2,1%	-2,7%
Total	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%

2132. L'évolution comparée de la répartition spatiale des déplacements

a. L'évolution comparée de la répartition spatiale des déplacements tous modes

La variation du taux de croissance du revenu ne modifie pas la structure spatiale de la répartition des déplacements tous modes.

b. L'évolution comparée de la répartition spatiale des déplacements en modes légers

La répartition spatiale des déplacements en modes légers se trouve modifiée. Une augmentation des taux de croissance du revenu induit une diminution du poids de la ville-centre dans les déplacements effectués en modes légers sur l'agglomération.

Tableau 6-34. Croissance différentielle de la répartition spatiale des déplacements en modes légers par rapport à 1995

	hypothèse 0,5%	hypothèse 1,5%	fil eau 2,5%	hypothèse 3,5%	hypothèse 4,5%
Centre - Centre	6%	6%	5%	3%	1%
Banlieue - Banlieue	8%	-8%	-7%	-6%	-5%
Périphérie - Périphérie	1%	1%	2%	3%	4%

c. L'évolution comparée de la répartition spatiale des déplacements en transports collectifs

Une augmentation du taux de croissance du revenu induit une augmentation du poids de la ville-centre dans les déplacements en transports collectifs et une diminution du poids des liaisons radiales centre-banlieue et centre-périphérie.

Tableau 6-35. Croissance différentielle de la répartition spatiale des déplacements en transports collectifs par rapport à 1995

	hypothèse 0,5%	hypothèse 1,5%	fil eau 2,5%	hypothèse 3,5%	hypothèse 4,5%
Centre - Centre	-3%	-1%	1%	3%	3%
Centre - Banlieue	-2%	-2%	-3%	-4%	-5%
Centre - Périphérie	-1%	1%	0%	-1%	-1%
Banlieue - Banlieue	-1%	-1%	-1%	-1%	-1%
Banlieue - Périphérie	0%	2%	1%	1%	1%
Périphérie - Périphérie	0%	2%	2%	2%	3%

d. L'évolution comparée de la répartition spatiale des déplacements en voiture particulière

Une augmentation du taux de croissance du revenu induit une augmentation du poids de la ville-centre dans les déplacements effectués en voiture particulière et une diminution du poids des liaisons radiales.

Tableau 6-36. Croissance différentielle de la répartition spatiale des déplacements en voiture particulière par rapport à 1995

	hypothèse 0,5%	hypothèse 1,5%	fil eau 2,5%	hypothèse 3,5%	hypothèse 4,5%
Centre - Centre	-5%	-4%	-2%	-1%	1%
Centre - Banlieue	-3%	-3%	-3%	-4%	-4%
Centre - Périphérie	-1%	0%	0%	-1%	-2%
Banlieue - Banlieue	-2%	-2%	-1%	-1%	-1%
Banlieue - Périphérie	1%	3%	2%	2%	1%
Périphérie - Périphérie	1%	4%	5%	5%	5%

2133. L'évolution comparée des distances parcourues

L'élévation du taux de croissance du revenu induit une très légère augmentation des distances parcourues totales, alors que la diminution du taux de croissance du revenu provoque une diminution notable des distances parcourues en voiture particulière. On peut noter que malgré une hausse des déplacements sur les liaisons internes à la couronne de banlieue dans les simulations *hypothèse 3,5%* et *hypothèse 4,5%*, les distances parcourues en voiture particulière ont tendance à diminuer. Cela traduit, comme cela a été déjà souligné, une redistribution des déplacements à l'intérieur de cette couronne.

Tableau 6-37. Evolution comparée des distances parcourues en uvp.km en heure de pointe du matin par rapport à 1995

	hypothèse 0,5%	hypothèse 1,5%	fil de l'eau 2,5%	hypothèse 3,5%	hypothèse 4,5%
Centre - Centre	-7%	0%	7%	18%	25%
Centre - Banlieue	-7%	-2%	0%	2%	4%
Centre - Périphérie	12%	16%	15%	14%	14%
Banlieue - Banlieue	-3%	-3%	-1%	-5%	-5%
Banlieue - Périphérie	35%	35%	39%	37%	34%
Périphérie - Périphérie	56%	56%	69%	66%	64%
Aire totale	18%	20%	25%	26%	26%

22. La sensibilité du modèle à la valeur de l'élasticité de la motorisation au revenu

En 19 ans, de 1976 à 1995, l'élasticité de la motorisation a diminué de 26%, soit un taux de croissance moyen annuel de -1,6% par an. Dans la situation *fil de l'eau*, l'élasticité de la motorisation au revenu est supposée conserver son niveau observé en 1995. Afin de tester la sensibilité du modèle à la valeur de l'élasticité de la motorisation au revenu, on considère que la diminution de l'élasticité de la motorisation diminue de -0,5% par an sur une période de 25 ans. A l'horizon 2020, l'élasticité prend alors comme valeur 0,36. L'élasticité du taux de motorisation au revenu intervient directement sur l'évolution des taux de motorisation. Le taux de motorisation intervient à plusieurs niveaux dans le modèle : dans un premier temps, il explique l'évolution des paramètres de conductance des modèles de distribution spatiale des déplacements. Une élévation du taux de motorisation conduit à une élévation de la propension à se déplacer plus longtemps. Dans un deuxième temps, les taux de motorisation zonaux interviennent dans le partage modal des déplacements entre les modes légers et les autres modes. Enfin, ils interviennent dans le partage entre les déplacements réalisés en voiture particulière et les transports collectifs.

Les écarts observés entre la simulation fil de l'eau et la simulation s'appuyant sur une variation de l'élasticité motorisation-revenu ne sont pas très élevés. La masse de

déplacements tous modes est par construction inchangée (taux identique de croissance du revenu). On constate, tout de même, une moindre progression de la part modale de la voiture particulière. Cela se traduit, entre autres, par une moindre progression des distances parcourues en voiture particulière.

Tableau 6-38. Croissance différentielle du nombre de déplacements par mode et des parts de marché par rapport à la simulation fil de l'eau

	Fil eau	%	variation élasticité motorisation	%	croissance différentielle fil eau / scénario	écarts des parts de marché
Modes légers	1 041 672	19,5%	1 053 226	19,7%	1%	0,2%
Voiture particulière	3 535 830	66,5%	3 507 886	65,7%	-1%	-0,5%
Transports collectifs	761 989	14,3%	778 379	14,6%	2%	0,3%
Total	5 339 491	100%	5 339 491	100%	0%	0,0%

Tableau 6-39. Croissance différentielle des distances parcourues en uvp.km en heure de point de matin par rapport à la simulation fil de l'eau

	Fil eau	variation élasticité motorisation-revenu	écart de croissance
Centre - Centre	275 359	268 061	-3%
Centre - Banlieue	253 514	252 320	0%
Centre - Périphérie	345 970	348 265	1%
Banlieue - Banlieue	141 267	140 733	0%
Banlieue - Périphérie	498 359	498 342	0%
Périphérie - Périphérie	488 359	483 898	-1%
Aire totale	2 002 635	1 991 619	-1%

Section 3. Un scénario volontariste de réduction de la mobilité en voiture particulière : le scénario *mobilité durable*

31. Les hypothèses scénariales

Ce scénario s'inscrit dans une démarche de développement durable⁴⁴ ou plus précisément, dans notre cas, de mobilité durable.

311. Les "armes" pour réduire la mobilité automobile

Les instruments de la politique de transport bien identifiés pour réduire la mobilité

automobile sont le péage urbain, la politique de stationnement, associés à une offre de transports collectifs compétitive.

3111. Le péage urbain

Le péage urbain apparaît comme une solution qui permet de réguler par l'argent l'occupation de la voirie tout en procurant des ressources nouvelles. On distingue le péage d'accès ou de zone et le péage d'ouvrage. Dans le péage de zone, il s'agit de tarifier l'accès aux zones les plus encombrées de la ville : centre historique dans les villes européennes, quartier des affaires ou « Central Business District » aux Etats-Unis. L'objectif est d'établir un cordon protecteur autour de l'hypercentre afin d'y éviter une concentration excessive de voitures, d'où l'expression de péage de cordon. Les péages d'axe ou d'ouvrage se rencontrent principalement sur les liaisons interurbaines. Ils correspondent à l'idée que des portions importantes d'autoroutes ou des ouvrages de caractère exceptionnel (tunnels autoroutiers de grande longueur, pont à grande portée, etc.) justifient la perception d'un péage de contribution aux dépenses d'infrastructures. Les objectifs du péage urbain sont doubles : d'une part contribuer au financement de l'ouvrage (péage de financement), d'autre part internaliser certains effets externes comme la congestion ou les atteintes à l'environnement provoquées par l'émission excessive de polluants (péage de régulation).

C'est le péage de régulation qui nous intéresse ici. Celui-ci n'a pas pour objectif d'obtenir des financements supplémentaires, d'augmenter le budget disponible, mais de restreindre la circulation par l'argent. Dans la pratique, le péage de concession s'applique à un axe (Marseille, Lyon) ou à la limite à un réseau (projet de Paris ou de Grenoble), alors que le péage de régulation s'applique à une zone (Singapour). Il faut savoir qu'en France, la loi n'autorise actuellement que le premier type de péage, puisqu'elle stipule que la mise en place du péage est conditionnée par la réalisation d'un montant minimum de travaux.

3112. La régulation du stationnement

Le stationnement est un élément essentiel dont disposent les élus et les techniciens pour organiser les déplacements urbains. Il peut avoir un impact très fort sur l'utilisation de l'automobile et la mobilité. Les interventions sur le stationnement peuvent s'effectuer par la réglementation, la tarification et l'incitation. Dans le cadre des simulations de notre modèle, seules les actions de tarification peuvent être retenues dans les variables de commande.

La tarification du stationnement doit tenir compte de la dimension spatiale et temporelle du stationnement : tarifier le centre plus que la périphérie, le rendre gratuit dans

⁴⁴ Aux termes de la loi du 2 février 1995, relative au renforcement de la protection de l'environnement, l'objectif de développement durable « vise à satisfaire les besoins de développement des générations présentes sans compromettre la capacités des générations futures à répondre aux leurs ». La loi évoque ensuite les principes suivants : principe de précaution, principe d'action préventive, et de corrections des atteintes à l'environnement, principe pollueur-payeur, principe de participation (accès aux informations pour chaque citoyen).

les zones d'échange et le tarifier différemment selon le moment de la journée. Le stationnement payant est vu comme un instrument pour réduire les déplacements en milieu urbain bien qu'à l'origine il n'ait pas été mis en place pour cela. En France, par exemple, la légitimité du stationnement payant réside dans l'objectif d'une plus grande rotation des véhicules sur les places existantes, tandis que l'interdiction de stationner a pour objectif, en général, d'assurer la fluidité de la circulation. Utiliser le stationnement payant et même la gestion du stock de places disponibles peut avoir des effets très positifs quand ces mesures sont incluses dans un ensemble cohérent. L'instrument de stationnement souffre toutefois de deux défauts, puisque tout d'abord il taxe une immobilité, donc n'est qu'indirectement en rapport avec la consommation environnementale et qu'ensuite la circulation se contentant de traverser les zones concernées par le stationnement payant n'est pas affectée par ce moyen. Ce deuxième point n'est pas négligeable dans les grandes agglomérations puisque le soulagement de la voirie résultant de la régulation par le stationnement serait immédiatement comblé par des automobilistes pouvant plus vite traverser l'agglomération que la contourner, ou bénéficiant d'un réseau périphérique d'accès moins encombré.

L'action sur le stationnement peut également passer par la réduction du nombre de places de stationnement. Ceci vise à réduire la circulation. En effet, l'argument est simple : en réduisant le nombre de places de stationnement au lieu de destination, on contraint le nombre de déplacements automobiles à cette destination.

3113. Les conditions du développement de l'offre en transports collectifs

Les besoins de financement public générés par le développement et l'exploitation des transports publics sont devenus de plus en plus lourds à supporter dans les années 80, dans le cadre de ressources financières de plus en plus rares. Malgré tout, le transport collectif, plus économe en ressources environnementales que la voiture particulière, là où il peut rentrer en concurrence avec la celle-ci dans des conditions économiques et sociales acceptables pour la collectivité, reste la solution à privilégier pour continuer à satisfaire les besoins de mobilité futurs. Les investissements en transports collectifs apparaîtraient même comme seuls à même de contenir la marée déferlante de l'automobile. En France, seules les agglomérations ayant fortement investi dans les transports en commun en site propre ont réussi à maintenir ou parfois améliorer quelque peu la part de marché de ce mode dans l'ensemble des déplacements motorisés.

312. Les politiques d'action retenues dans le modèle

3121. Le péage urbain

Un péage de cordon d'accès à la ville-centre est instauré. Son prix est fixé à 10 F par passage. Ainsi chaque véhicule ayant comme destination la ville-centre, ou traversant la ville-centre se voit pénaliser de 10 F. Cette pénalité est intégrée dans les coûts généralisés en voiture particulière.

3122. La politique de stationnement

a. Réduction des capacités de stationnement

En 25 ans, on considère que les capacités de stationnement dans la ville-centre sont réduites de 20%, ce qui représente une diminution de 0,7% par an. Cela a pour conséquence d'augmenter les temps de recherche d'une place de stationnement et donc d'augmenter les temps généralisés de déplacements en voiture particulière.

b. Augmentation de la tarification du stationnement

La tarification du stationnement dans l'hypercentre est doublée (elle passe de 4F à 8F). Par ailleurs, on applique une tarification au stationnement dans les autres zones composant la ville-centre (tarif moyen de 4 F). Cela a pour conséquence d'accroître les temps généralisés de déplacements à destination de la ville-centre.

3123. Une offre en transports collectifs plus compétitive

Les douze lignes fortes envisagées dans le PDU sont aménagées, c'est-à-dire que sur les lignes concernées, les fréquences et les vitesses commerciales sont améliorées.

32. L'évolution du système de déplacements à un horizon 2020 pour la simulation du scénario *mobilité durable*

321. L'évolution des masses de déplacements et des parts modales

Le scénario étudié est nommé « *mobilité durable* » dans la mesure où ses objectifs sont la promotion d'un développement durable de la mobilité, visant à minimiser les consommations des ressources environnementales.

La masse de déplacements tous modes est identique à celle observée en simulation fil de l'eau. En revanche, on constate des variations non négligeables des parts modales. La part modale de la voiture particulière progresse à un taux inférieur de 5% à celui observé pour la simulation fil de l'eau, tandis que la part modale des modes légers progresse à un taux supérieur de 4% à celui observé pour la simulation fil de l'eau.

Tableau 6-40. Evolution différentielle du nombre de déplacements et des parts de marché par mode par rapport à la simulation fil de l'eau

	Fil eau	%	Mobilité durable	%	croissance différentielle	écart des parts modales
Modes légers	1 041 672	20%	1 260 005	24%	21%	4%
Voiture particulière	3 535 830	66%	3 292 472	62%	-7%	-4%
Transports collectifs	761 989	14%	787 014	15%	3%	+1%
Total	5 339 491	100%	5 339 491	100%	0%	0%

322. L'évolution de la répartition spatiale des déplacements

3221. L'évolution de la répartition spatiale des déplacements tous modes

La simulation du scénario *mobilité durable* induit une progression plus forte des déplacements effectués dans la ville-centre au détriment des liaisons radiales. Les déplacements internes à la banlieue et à la périphérie augmentent également plus fortement.

Tableau 6-41. Evolution différentielle de la répartition spatiale des déplacements tous modes par rapport à la simulation fil de l'eau

	Fil eau	%	Mobilité durable	%	Croissance différentielle	écart de répartition spatiale
Centre - Centre	1 700 834	32%	1 851 537	35%	9%	3%
Centre - Banlieue	876 294	16%	692 779	13%	-20%	-3%
Centre - Périphérie	457 587	9%	384 130	7%	-21%	-2%
Banlieue - Banlieue	452 700	8%	560 449	10%	24%	2%
Banlieue - Périphérie	746 710	14%	695 855	13%	-6%	-1%
Périphérie - Périphérie	1 088 022	20%	1 154 742	22%	6%	1%
Aire totale	5 339 491	100%	5 339 491	100%	0%	0%

3222. L'évolution de la répartition spatiale des déplacements en modes légers

La progression des déplacements en modes légers se fait plus favorablement sur les intrazones de banlieue (la croissance est supérieure de 3% à celle du fil de l'eau) et moins favorablement dans la ville-centre et en périphérie (respectivement -2% et -1%).

Tableau 6-42. Evolution différentielle de la répartition spatiale des déplacements en modes légers par rapport à la simulation fil de l'eau

	Fil eau	%	Mobilité durable	%	Croissance différentielle	écart de répartition spatiale
Centre - Centre	710 704	68%	831 509	66%	17%	-2%
Banlieue - Banlieue	144 294	14%	211 118	17%	49%	3%
Périphérie - Périphérie	189 675	18%	217 378	17%	15%	-1%
Aire totale	1 041 673	100%	1 260 005	100%	21%	0%

3223. L'évolution de la répartition spatiale des déplacements en transports collectifs

La progression des déplacements en transports collectifs est plus favorable à la ville-centre que pour le fil de l'eau (+20%). Cela s'explique par des mesures d'amélioration de la compétitivité des transports collectifs. Elle est par contre moindre sur les liaisons radiales.

Tableau 6-43. Evolution différentielle de la répartition spatiale des déplacements en transports collectifs par rapport à la simulation fil de l'eau

	Fil eau	%	Mobilité durable	%	Croissance différentielle	écart de répartition spatiale
Centre - Centre	620 130	42%	344 235	44%	8%	2%
Centre - Banlieue	167 899	22%	156 965	20%	-7%	-2%
Centre - Périphérie	81 856	11%	85 212	11%	4%	0%
Banlieue - Banlieue	45 532	6%	54 171	7%	19%	1%
Banlieue - Périphérie	79 247	10%	73 285	9%	-6%	-1%
Périphérie - Périphérie	68 324	9%	73 146	9%	7%	0%
Aire totale	761 988	100%	787 014	100%	3%	0%

3224. L'évolution de la répartition spatiale des déplacements en voiture particulière

Les mesures prises dans le scénario *mobilité durable* ont des effets sur la progression du nombre de déplacements en voiture particulière sur les liaisons radiales avec le centre. Cela résulte de la mise en place d'un péage de cordon d'accès à la ville-centre. En revanche, les déplacements en voiture particulière sur les liaisons tangentielles (internes à la périphérie) progressent plus fortement.

Tableau 6-44. Evolution différentielle de la répartition spatiale des déplacements en voiture particulière par rapport à la simulation fil de l'eau

	Fil eau	%	Mobilité durable	%	Croissance différentielle	écart de répartition spatiale
Centre - Centre	670 001	19%	675 792	21%	1%	2%
Centre - Banlieue	702 395	20%	535 814	16%	-24%	-4%
Centre - Périphérie	405 731	11%	298 918	9%	-26%	-2%
Banlieue - Banlieue	265 874	8%	295 161	9%	11%	1%
Banlieue - Périphérie	661 607	19%	622 570	19%	-6%	0%
Périphérie - Périphérie	880 022	23%	864 218	26%	4%	3%
Aire totale	3 535 830	100%	3 292 472	100%	-7%	0%

323. L'évolution des parts modales par type de liaison

Sur l'espace urbain, les mesures de restriction de l'usage de la voiture particulière sont une augmentation et une généralisation du stationnement payant et une diminution du nombre de places de stationnement disponibles. Cela a pour conséquence directe d'infléchir de 3 points la part de marché de la voiture particulière par rapport à la simulation fil de l'eau. Cette baisse profite aux modes légers qui gagnent 3 points de parts de marché. Sur les liaisons radiales (centre - banlieue, centre - périphérie), les déplacements en voiture particulière sont pénalisés par la mise en place d'un péage cordon d'accès à la ville-centre. Cela se traduit par des pertes de parts de marché de la voiture particulière de 4 points et 5 points sur, respectivement, la liaison centre - banlieue et la liaison centre - périphérie. Ces pertes sont récupérées par les transports collectifs. Un report modal des déplacements en voiture particulière vers les déplacements en transports collectifs sur ces liaisons est ainsi réalisé.

Tableau 6-45. Evolution différentielle des parts modales par type de liaisons géographiques par rapport à la simulation fil de l'eau

	Modes légers	Transports collectifs	Voiture particulière
Centre - Centre	+3	=	-3
Centre - Banlieue	-	+4	-4
Centre - Périphérie	-	+5	-5
Banlieue - Banlieue	+7	=	-6
Banlieue - Périphérie	-	=	=
Périphérie - Périphérie	+2	=	-1

324. L'évolution des distances parcourues

Les distances parcourues en u.v.p*km diminuent globalement sur l'aire d'étude (-15%) et plus particulièrement sur la liaison Centre - Périphérie (-25%).

Tableau 6-46. Evolution différentielle des distances parcourues en uvp.km en heure de pointe du matin par rapport à la simulation fil de l'eau

	Fil eau	Mobilité durable	croissance différentielle
Centre - Centre	275 359	273 157	-1%
Centre - Banlieue	253 514	220 017	-21%
Centre - Périphérie	345 970	291 359	-25%
Banlieue - Banlieue	141 267	121 504	-17%
Banlieue - Périphérie	498 359	428 711	-15%
Périphérie - Périphérie	488 166	432 241	-12%
Aire totale	2 002 635	1 766 989	-15%

33. La nécessité des actions de limitation de l'usage de la voiture particulière

Deux variantes au scénario de *mobilité durable* ont été mises en oeuvre. La première ne considère que les mesures d'amélioration de l'offre de transport public (scénario nommé *développement TC*), la seconde n'envisage que les mesures de restriction sur l'usage de la voiture particulière (scénario nommé *restriction VP*).

Le scénario *développement TC* conduit à une croissance du nombre de déplacements en transports collectifs légèrement inférieure de celle observée dans la simulation *mobilité durable*. En revanche, des actions ne visant qu'à restreindre la mobilité en voiture particulière ne favorisent pas l'augmentation des déplacements en transports collectifs. En effet, pour le scénario *Restriction VP*, on observe une évolution moindre des déplacements en transports collectifs que celle du fil de l'eau. Par ailleurs, ce dernier scénario ne permet pas de pénaliser l'usage de la voiture particulière aussi fortement que ne l'autorise le scénario *mobilité durable*. Les deux types de mesures sont donc fortement complémentaires.

Tableau 6-47. Evolution différentielle du nombre de déplacements par mode par rapport à la simulation *mobilité durable*

	Fil eau	Mobilité durable	crois. dif	Dévelopm TC	crois. dif.	Restriction VP	crois. dif.
Modes légers	1 041 672	1 260 005	21,0%	1 177 588	13,0%	1 179 701	13,3%
Voiture particulière	3 535 830	3 292 472	-6,9%	3 382 247	-4,3%	3 410 689	-3,5%
Transports collectifs	761 989	787 014	3,3%	779 656	2,3%	749 102	-1,7%
Total	5 339 491	5 339 491	0,0%	5 339 491	0,0%	5 339 491	0,0%

Cela montre (s'il y a avait encore à le démontrer) qu'une offre de transports publics performante ne suscite pas les reports d'usage ou reports modaux attendus. Des investissements massifs dans des nouveaux modes de transports publics urbains tels que les tramways attirent certes de nouveaux usagers, mais pratiquement pas d'automobilistes.

34. Les poids relatifs de chacune des mesures de restriction de la mobilité en voiture particulière

Afin d'analyser le poids relatif de chacune des mesures du scénario de restriction de la mobilité en voiture particulière, ces mesures ont été simulées de façon isolée, toutes choses étant égales par ailleurs. Il apparaît nettement que c'est la mesure de péage urbain qui emporte la majorité des effets sur les déplacements en voiture particulière. Cette mesure pénalise très fortement la progression du nombre des déplacements en voiture particulière sur les liaisons radiales avec la ville-centre. C'est également elle qui est à l'origine de la diminution des distances parcourues en voiture particulière. Cependant, la mesure de péage cordon ne favorise pas pour autant l'usage des transports collectifs. Le nombre de déplacements en transports collectifs diminue dans la simulation de péage cordon par rapport à la simulation *fil de l'eau*, plus fortement d'ailleurs que lorsque l'on considère la simulation mettant en oeuvre l'ensemble des mesures de restriction de la voiture particulière. Par ailleurs, les mesures de stationnement payant et de réduction des capacités de stationnement dans la ville-centre aboutissent à des résultats quasiment identiques. Ces deux dernières mesures n'ont pas d'effets très marqués sur l'évolution des déplacements par mode.

Tableau 6-48. Evolution différentielle du nombre de déplacements par mode par rapport à la simulation *fil de l'eau* (taux de croissance)

	scénario restriction VP	péage cordon	stationnement payant	réduction des capacités de stationnement
Modes légers	13,3%	15,1%	2,7%	2,7%
Voiture particulière	-3,5%	-3,8%	-0,7%	-0,7%
Transports collectifs	-1,7%	-3,2%	-0,2%	-0,2%
Total	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%

Tableau 6-49. Evolution différentielle du nombre de déplacements en voiture particulière par type de liaison par rapport à la simulation *fil de l'eau* (taux de croissance)

	scénario restriction VP	péage cordon	stationnement payant	réduction des capacités de stationnement
Centre - Centre	2%	2%	-2%	-2%
Centre - Banlieue	-20%	-19%	-3%	-3%
Centre - Périphérie	-21%	-24%	-3%	-3%
Banlieue - Banlieue	7%	11%	1%	1%
Banlieue - Périphérie	9%	3%	2%	2%
Périphérie - Périphérie	1%	4%	0%	0%
Total	-4%	-4%	-1%	-1%

Tableau 6-50. Evolution différentielle des distances parcourues en voiture particulière par type de liaison par rapport à la simulation *fil de l'eau* (taux de croissance)

	scénario restriction VP	péage cordon	stationnement payant	réduction des capacités de stationnement
Centre - Centre	0%	1%	-2%	-1%
Centre - Banlieue	-13%	-13%	-2%	-1%
Centre - Périphérie	-15%	-18%	-2%	0%
Banlieue - Banlieue	2%	3%	2%	0%
Banlieue - Périphérie	2%	-1%	1%	0%
Périphérie - Périphérie	4%	-3%	-1%	-3%
Total	-5%	-6%	-1%	-1%

Section 4. Un scénario de maîtrise de l'aménagement urbain

La planification spatiale est également un outil de maîtrise de la mobilité à la disposition des pouvoirs publics. Dans notre modèle, la dynamique de l'urbanisation est prise en compte dans les modules de développement urbain et de structuration urbaine. Cependant, afin de ne pas adopter un caractère trop mécanique du fonctionnement urbain, nous avons considéré que seulement une partie des localisations des résidents et des activités induites pouvaient être expliquée par les relations économétriques établies. Le fonctionnement de la ville ne saurait se résumer à des fonctionnements mécaniques. C'est pourquoi la simulation d'un scénario de maîtrise de l'aménagement urbain conserve sa pertinence dans la logique du modèle. Ce scénario relève d'une démarche prospective dans la mesure où notre modèle ne présente pas de variables de commande pouvant agir directement sur l'aménagement urbain (comme des instruments de politiques foncières, des instruments de réglementation relatifs aux plans d'occupation des sols, *etc.*).

41. Les enjeux d'une politique de maîtrise de l'aménagement urbain

La compréhension de la transformation historique des espaces permet d'avancer l'idée que la mobilité est une production sociale largement déterminée par l'interaction des

formes urbaines de plus en plus déconcentrées et de techniques de transport de masses de plus en plus rapides (Bieber, Massot, Orfeuil, 1993). Le scénario construit se rapproche du scénario Rhénan proposé par Bieber, Massot et Orfeuil (1993). Cependant, nous ne retenons que les stratégies d'urbanisme de ce scénario (les auteurs, dans leur démarche prospective considèrent également les stratégies en termes de réseaux de transport et de communication). Le scénario Rhénan est caractérisé par un état de fortes contraintes d'expansion spatiale excluant l'urbanisation massive des zones rurales périphériques et par une tradition urbanistique basée sur l'exploitation intensive des infrastructures existantes. La régulation des formes urbaines conduit à un maintien des centres historiques et une diffusion autour d'un urbanisme polyfonctionnel résidentiel et tertiaire.

42. Définition des hypothèses scénariales

Le modèle ne dispose pas de variables de commande susceptibles d'agir sur l'aménagement urbain, aussi nous nous mettons dans la perspective que des mesures ont été prises et qu'elles aboutissent à l'aménagement urbain voulu. Des taux de déformation sont appliqués aux taux zonaux de croissance de la population totale, de la population active et des emplois totaux. Les taux de déformation sont considérés par grands secteurs concentriques : la ville-centre, la première couronne, la deuxième couronne et le grand périurbain.

Tableau 6-51. Taux de déformation des taux de croissance de la population totale, de la population active et des emplois totaux⁴⁵

	Population totale	Population active	Emplois totaux
Ville-centre	+ 20%	+ 20%	+ 20%
Première couronne	+ 10%	+ 10%	+ 10%
Deuxième couronne	- 10%	- 10%	- 10%
Grand périurbain	- 20%	- 20%	- 20%

Ces taux de déformation conduisent à freiner la tendance d'étalement urbain et à redensifier la ville centre et sa première couronne.

43. Effets sur le système des déplacements à l'horizon 2020 pour la simulation du scénario *aménagement urbain*

431. L'évolution des masses de déplacements et des parts modales

La progression des déplacements tous modes est identique à celle observée pour la simulation *fil de l'eau*. Les mesures d'aménagement urbain entraînent une progression plus forte du nombre de déplacements en transports collectifs (+3% par rapport à la

⁴⁵ Afin de pouvoir analyser ce scénario par rapport à la simulation « fil de l'eau », les évolutions globales sur l'aire d'étude de la population totale, de la population active et des emplois totaux sont supposées être identiques dans les deux scénarios. Pour ce faire, les taux de déformation sont corrigés.

progression fil de l'eau) et une progression plus faible du nombre de déplacements en voiture particulière (-4% par rapport à la progression fil de l'eau). En termes de parts modales, les modes légers gagnent environ 2 points par rapport au fil de l'eau, les transports collectifs en gagnent 0,5, et la voiture particulière en perd 2,5.

Les mesures de l'aménagement urbain vont donc dans le sens d'une maîtrise de l'usage de la voiture particulière.

Tableau 6-52. Evolution différentielle du nombre de déplacements et des parts de marché par mode part rapport à la simulation fil de l'eau

	Fil eau	%	Aménagement urbain	%	croissance différentielle	écarts de parts modales
Modes légers	1 041 672	20%	1 144 566	21%	10%	2,0%
Voiture particulière	3 535 830	66%	3 408 507	64%	-4%	-2,5%
Transports collectifs	761 989	14%	786 418	15%	3%	0,5%
Total	5 339 491	100%	5 339 491	100%	0%	0%

432. L'évolution de la répartition spatiale des déplacements

4321. L'évolution de la répartition spatiale des déplacements tous modes

Par rapport à la simulation *fil de l'eau*, les mesures d'aménagement urbain aboutissent à une progression supérieure de 14% du nombre de déplacements tous modes dans la ville-centre, et une croissance supérieure de 3% des déplacements internes à la banlieue. Par contre, les déplacements tangentiels (internes à la couronne de périphérie) connaissent une progression inférieure de 19% à la progression *fil de l'eau*. Cela est notable car ce sont les déplacements qui génèrent les distances parcourues les plus importantes. Enfin, la liaison radiale centre-périphérie connaît une progression inférieure de 9% par rapport à la simulation fil de l'eau.

Tableau 6-53. Evolution différentielle du nombre de déplacements tous modes par type de liaison géographique et de la structure spatiale en % par rapport à la simulation fil de l'eau.

	Fil eau	%	Aménagement urbain	%	Croissance différentielle	écart de répartition spatiale
Centre - Centre	1 700 834	32%	1 941 008	36%	14%	4%
Centre - Banlieue	876 294	16%	863 732	16%	-1%	0%
Centre - Périphérie	487 587	9%	441 788	8%	-9%	-1%
Banlieue - Banlieue	452 700	8%	466 625	9%	3%	0%
Banlieue - Périphérie	740 054	14%	748 312	14%	1%	0%
Périphérie - Périphérie	1 088 022	20%	878 028	16%	-19%	-4%
Aire totale	5 339 491	100%	5 339 491	100%	0%	0%

4322. L'évolution de la répartition spatiale des déplacements en modes légers

La progression des déplacements en modes légers se réalise plus fortement sur la ville-centre (+18% par rapport au fil de l'eau) et plus faiblement sur la couronne de périphérie (-21% par rapport au fil de l'eau).

Tableau 6-54. Evolution différentielle du nombre de déplacements en modes légers par type de liaison géographique et de la structure spatiale en % par rapport à la simulation fil de l'eau

	Fil eau	%	Aménagement urbain	%	Croissance différentielle	écart de répartition spatiale
Centre - Centre	1 10 704	68%	841 588	74%	18%	5%
Banlieue - Banlieue	141 294	14%	152 478	13%	8%	0%
Périphérie - Périphérie	189 175	18%	150 500	13%	-21%	-5%
Aire totale	1 041 673	100%	1 144 566	100%	10%	0%

4323. L'évolution de la répartition spatiale des déplacements en transports collectifs

La croissance du nombre de déplacements en transports collectifs est supérieure à celle observée en simulation *fil de l'eau* pour toutes les liaisons exceptées la liaison centre-périphérie (-11%) et la liaison tangentielle interne à la couronne de périphérie (-20%). En revanche, la progression des déplacements en transports collectifs dans la ville-centre est supérieure de 13% à celle observée en *fil de l'eau*.

Tableau 6-55. Evolution différentielle du nombre de déplacements en transports collectifs par type de liaison géographique et de la structure spatiale en % par rapport à la simulation fil de l'eau

	Fil eau	%	Aménagement urbain	%	Croissance différentielle	écart de répartition spatiale
Centre - Centre	320 130	42%	362 901	46%	13%	4%
Centre - Banlieue	167 899	22%	170 403	22%	1%	0%
Centre - Périphérie	81 856	11%	72 636	9%	-11%	2%
Banlieue - Banlieue	45 562	6%	46 368	6%	2%	0%
Banlieue - Périphérie	79 247	10%	79 274	10%	1%	0%
Périphérie - Périphérie	68 321	9%	54 837	7%	-20%	-2%
Aire totale	761 988	100%	786 418	100%	3%	0%

4324. L'évolution de la répartition spatiale des déplacements en voiture particulière

Le nombre de déplacements en voiture particulière progresse plus fortement dans la ville-centre (+10% par rapport au fil de l'eau) et légèrement plus fortement pour les liaisons internes à la couronne de banlieue et sur la liaison banlieue-périphérie (+1% pour chaque type de liaison). La progression du nombre de voitures particulières est par contre plus faible que celle constatée en situation fil de l'eau pour les liaisons tangentielles périphérie-périphérie (-19%) et radiales (centre-périphérie, -9% et centre-banlieue, -1%).

Tableau 6-56. Evolution différentielle du nombre de déplacements en voiture particulière et de la structure spatiale en % par rapport à la simulation fil de l'eau

	Fil eau	%	Aménagement urbain	%	Croissance différentielle	écart de répartition spatiale
Centre - Centre	170 001	19%	736 519	22%	10%	3%
Centre - Banlieue	102 395	20%	693 329	20%	-1%	0%
Centre - Périphérie	45 731	11%	369 151	11%	-9%	-1%
Banlieue - Banlieue	26 874	8%	267 779	8%	1%	0%
Banlieue - Périphérie	66 807	19%	669 038	20%	1%	1%
Périphérie - Périphérie	88 022	23%	672 691	20%	-19%	-4%
Aire totale	3 535 830	100%	3 408 507	100%	-4%	0%

433. L'évolution des parts modales par type de liaison

La voiture particulière perd des parts de marché sur toutes les liaisons géographiques, excepté entre les zones de la couronne de périphérie. Ces résultats s'expliquent par le fait que la croissance urbaine se réalise sur des espaces denses où les modes légers et les transports collectifs peuvent « tirer leur épingle du jeu », elle se réalise en revanche en défaveur des espaces de périphérie moins denses où la voiture particulière est dominante.

Tableau 6-57. Evolution des parts modales par type de liaison par rapport à la simulation fil de l'eau

	Modes légers	Transports collectifs	Voiture particulière
Centre - Centre	+1	=	-1
Centre - Banlieue	-	+1	-1
Centre - Périphérie	-	-1	-1
Banlieue - Banlieue	+2	=	-2
Banlieue - Périphérie	-	=	=
Périphérie - Périphérie	=	=	+1

434. L'évolution des distances parcourues

Le scénario d'aménagement urbain conduit à une évolution des distances parcourues moins importante que celle constatée dans la simulation fil de l'eau (-3%). Ce différentiel s'explique par la moindre progression du nombre d'u.v.p*km sur les liaisons avec la périphérie.

Tableau 6-58. Evolution différentielle des distances parcourues en uvp.km en heure de pointe du matin par rapport à la simulation fil de l'eau

	Fil eau	Aménagement urbain	croissance différentielle
Centre - Centre	275 359	305 898	11%
Centre - Banlieue	253 514	269 655	6%
Centre - Périphérie	345 970	322 805	-7%
Banlieue - Banlieue	141 267	140 064	-1%
Banlieue - Périphérie	498 267	494 581	-1%
Périphérie - Périphérie	488 166	409 714	-16%
Aire totale	2 002 635	1 942 717	-3%

Section 5. Un scénario favorable au développement routier

51. Les hypothèses scénariales

Plusieurs hypothèses scénariales sont posées dans le but de faciliter la circulation routière. Des capacités routières sur certaines liaisons ont été ajoutées, les temps d'accès au réseau ont été diminués signifiant une amélioration du réseau secondaire, enfin les capacités de stationnement dans la ville centre sont augmentées de 20% sur la période de simulation (1995-2020).

52. L'évolution du système de déplacements à un horizon 2020 pour la simulation du scénario *développement routier*

521. L'évolution des masses de déplacements et des parts modales

Ce scénario permet une progression plus forte du nombre de déplacements réalisés en voiture particulière par rapport à la simulation fil de l'eau (+3%), cela se fait au détriment des déplacements en modes légers (-13%). Ce qui paraît surprenant est de constater une légère progression des déplacements en transports collectifs par rapport à la simulation fil de l'eau (+2%). Cela peut s'expliquer par une amélioration des conditions de circulation en voirie de surface, permettant de meilleures vitesses commerciales. Cependant, cela semble montrer également une limite du modèle concernant le module de partage VP/TC. En effet, celui-ci ne semble pas être suffisamment réactif aux modifications relatives à l'offre de transport.

Tableau 6-59. Evolution du nombre de déplacements tous modes et des parts de marché par mode par rapport à la simulation fil de l'eau

	Fil eau	part de marché	développement routier	part de marché	croissance différentielle	écart des parts de marché
Modes légers	1 041 672	20%	906 125	17%	-13%	-3%
Voiture particulière	3 535 830	66%	3 658 479	69%	3%	+3%
Transports collectifs	761 989	14%	774 888	14%	2%	0%
Total	5 339 491	100%	5 339 491	100%	0%	0%

522. L'évolution de la répartition spatiale des déplacements

5221. L'évolution de la répartition spatiale des déplacements tous modes

Le scénario de développement routier conduit à favoriser la progression du nombre de déplacements tous modes sur les liaisons radiales (centre - banlieue, centre - périphérie) et sur la liaison banlieue - périphérie. Cela peut être expliqué lorsque l'on examine l'évolution de la répartition spatiale des déplacements par mode.

Tableau 6-60. Evolution du nombre de déplacements tous modes et des parts de marché par mode par rapport à la simulation fil de l'eau

	Fil eau	répartition spatiale	développement routier	répartition spatiale	croissance différentielle	écart de répartition spatiale
Centre - Centre	1 700 834	32%	1 625 542	30%	-4%	-1%
Centre - Banlieue	876 294	16%	916 462	17%	5%	1%
Centre - Périphérie	187 587	9%	574 077	11%	18%	2%
Banlieue - Banlieue	452 700	8%	403 264	8%	-11%	-1%
Banlieue - Périphérie	740 054	14%	795 532	15%	7%	1%
Périphérie - périphérie	1 088 022	20%	1 024 614	19%	-6%	-1%
Aire totale	5 339 491	100%	5 339 491	100%	0%	0%

5222. L'évolution de la répartition spatiale des déplacements en modes légers

Par rapport à la simulation fil de l'eau, les déplacements en modes légers connaissent une moins forte progression sur toutes les couronnes.

Tableau 6-61. Evolution de la répartition spatiale du nombre de déplacements en modes légers rapport à la simulation fil de l'eau

	Fil eau	répartition spatiale	développement routier	répartition spatiale	croissance différentielle	écart de répartition spatiale
Centre - Centre	710 704	68%	632 103	70%	-11%	2%
Banlieue - Banlieue	114 294	14%	115 344	13%	-18%	-1%
Périphérie - périphérie	189 678	18%	158 678	18%	-16%	-1%
Aire totale	1 041 673	100%	906 125	100%	-13%	0%

5223. L'évolution de la répartition spatiale des déplacements en transports collectifs

Le nombre de déplacements en transports collectifs connaît une progression moindre à l'intérieur de chaque secteur. Par contre, leur nombre augmente par rapport à la simulation fil de l'eau sur la liaison radiale centre - périphérie.

Tableau 6-62. Evolution de la répartition spatiale du nombre de déplacements en transports collectifs par rapport à la simulation fil de l'eau

	Fil eau	répartition spatiale	développement routier	répartition spatiale	croissance différentielle	écart de répartition spatiale
Centre - Centre	320 130	42%	318 087	41%	-1%	-1%
Centre - Banlieue	167 899	22%	171 799	22%	2%	0%
Centre - Périphérie	81 856	11%	94 048	12%	15%	1%
Banlieue - Banlieue	45 562	6%	42 133	5%	-7%	-1%
Banlieue - Périphérie	79 247	10%	82 701	11%	6%	0%
Périphérie - Périphérie	68 321	9%	66 119	9%	-3%	0%
Aire totale	761 988	100%	774 888	100%	2%	0%

5224. L'évolution de la répartition spatiale des déplacements en voiture particulière

Le nombre de déplacements en véhicule particulier augmente par rapport à la simulation fil de l'eau sur toutes les liaisons excepté en ce qui concerne les liaisons internes à la couronne de banlieue et à la couronne périphérique. Cette répartition s'explique par le fait que les conditions de circulation sont améliorées sur les liaisons radiales conduisant à un report des déplacements sur ces liaisons en défaveur des liaisons tangentielles.

Tableau 6-63. Evolution de la répartition spatiale du nombre de déplacements en voiture particulière rapport à la simulation fil de l'eau

	Fil eau	répartition spatiale	développement routier	répartition spatiale	croissance différentielle	écart de répartition spatiale
Centre - Centre	167 001	19%	675 352	18%	1%	0%
Centre - Banlieue	202 395	20%	744 663	20%	6%	0%
Centre - Périphérie	145 731	11%	480 029	13%	18%	2%
Banlieue - Banlieue	265 874	8%	245 787	7%	-8%	-1%
Banlieue - Périphérie	661 807	19%	712 832	19%	8%	1%
Périphérie - Périphérie	810 022	23%	799 817	22%	-4%	-2%
Aire totale	3 535 830	100%	3 658 479	100%	3%	0%

523. L'évolution des distances parcourues

La progression des distances parcourues est plus forte que celle observée en simulation fil de l'eau (+8%). Ceci ne s'explique pas seulement par l'augmentation du nombre de déplacements en voiture particulière mais aussi par la redistribution spatiale des déplacements. Le nombre d'u.v.p*km augmente sur la liaison centre - périphérie, liaison sur laquelle le nombre de déplacements en voiture particulière est également en augmentation, mais il progresse également sur les liaisons tangentielles sur la couronne de périphérie, alors que le nombre de déplacements est en diminution sur ce secteur. Cela traduit une redistribution spatiale des flux à l'intérieur de ce secteur qui se réalise

vers des échanges entre des zones de la couronne périphérique plus éloignées.

Tableau 6-64. Evolution des distances parcourues en uvp*km en heure de pointe du matin dans la simulation *développement routier* par rapport à la simulation *fil de l'eau*

	Fil eau	Développement routier	croissance différentielle
Centre - Centre	275 359	284 532	3%
Centre - Banlieue	253 514	266 170	5%
Centre - Périphérie	345 970	394 812	14%
Banlieue - Banlieue	141 267	144 356	2%
Banlieue - Périphérie	498 359	540 755	9%
Périphérie - Périphérie	488 166	539 881	11%
Aire totale	2 002 635	2 170 506	8%

Conclusion du chapitre 6. Synthèse des résultats et principaux enseignements

Cette section a pour objet de faire la synthèse des résultats des différentes simulations. Cet exercice a un double objectif. D'une part, il doit permettre de réaliser un examen critique du fonctionnement du modèle afin d'en tirer la portée et les limites techniques, méthodologiques et conceptuelles. D'autre part, il doit conduire à dégager certains enseignements en matière de planification des transports.

61. La comparaison des résultats des différentes simulations

Les simulations retenues sont celles des scénarios suivants : *mobilité durable*, *aménagement urbain*, *développement routier* ainsi qu'un scénario qui n'a pas été analysé jusqu'à présent et qui se définit comme la combinaison des scénarios de mobilité durable et d'aménagement urbain (ce scénario est nommé *combiné*). En outre, les simulations des tests de sensibilité au taux de croissance du revenu sont également prises en compte (le test en *hypothèse basse* 0,5% ainsi que le test en *hypothèse haute* 4,5%).

611. L'évolution des masses de déplacements et des parts modales

Ce qui est remarquable est de constater que la variable revenu est celle qui a le plus d'impact sur la progression des déplacements en transports collectifs. Il faut cependant garder à l'esprit que la variation de cette variable agit directement sur le taux de mobilité quotidienne et donc sur le nombre de déplacements tous modes. Toutefois, même si l'on considère constant le nombre de déplacements tous modes (en appliquant une règle de trois), la variable revenu est celle qui a le plus d'impact sur les déplacements effectués en transports collectifs.

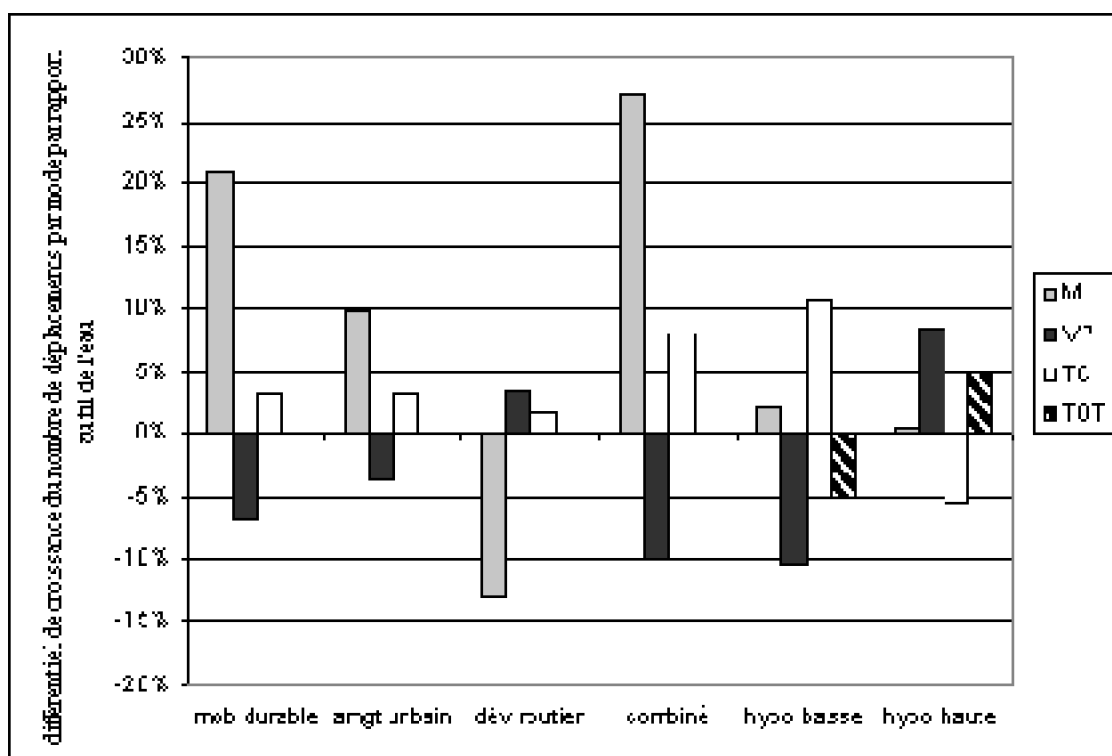
Les mesures de restriction de la mobilité en voiture particulière prises dans le *scénario mobilité durable* montrent leur efficacité en termes de rééquilibrage de l'usage

des modes de transport. Si le scénario de *mobilité durable* et celui d'*aménagement urbain* permettent une progression des déplacements en transports collectifs à la même hauteur, les mesures de restriction de la mobilité en voiture particulière s'avèrent toutefois plus efficaces sur l'usage de la voiture particulière que les mesures d'aménagement urbain.

La combinaison des scénarios mobilité durable et aménagement urbain aboutit à renforcer les effets conjoints des deux scénarios.

Tableau 6-65. Croissance différentielle du nombre de déplacements par mode par rapport à la simulation fil de l'eau

	Mobilité durable (1)	aménagement urbain (2)	développement routier	Combinaison (1) et (2)	hypothèse basse	hypothèse haute
Modes légers	21%	10%	-13%	27%	2%	1%
Voiture particulière	-7%	-4%	3%	-10%	-10%	8%
Transports collectifs	3%	3%	2%	8%	11%	-5%
Total	0%	0%	0%	0%	-5%	5%



Graphique 6-. Croissance différentielle du nombre de déplacements par mode par rapport à la simulation fil de l'eau

On retrouve les mêmes tendances en termes de parts de marché.

Tableau 6-66. Evolution différentielle des parts de marché par mode par rapport à la simulation fil de l'eau

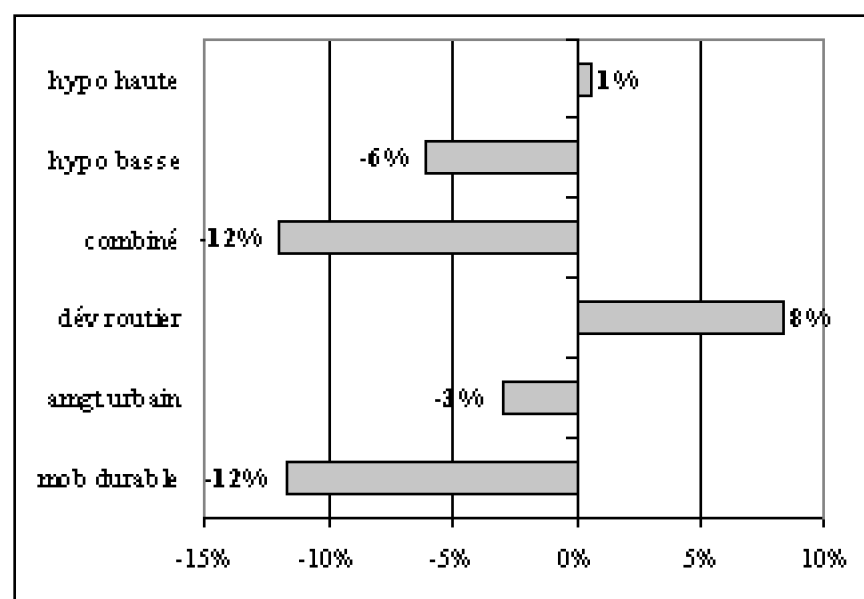
	Mobilité durable (1)	aménagement urbain (2)	développement routier	Combinaison (1) et (2)	hypothèse basse	hypothèse haute
Modes légers	4,1%	1,9%	-2,5%	5,4%	1,4%	-0,8%
Voiture particulière	-4,6%	-2,4%	2,3%	-6,5%	-3,8%	2,2%
Transports collectifs	0,5%	0,5%	0,2%	1,1%	2,3%	-1,4%
Total	0%	0%	0%	0%	0%	0%

612. L'évolution des distances parcourues

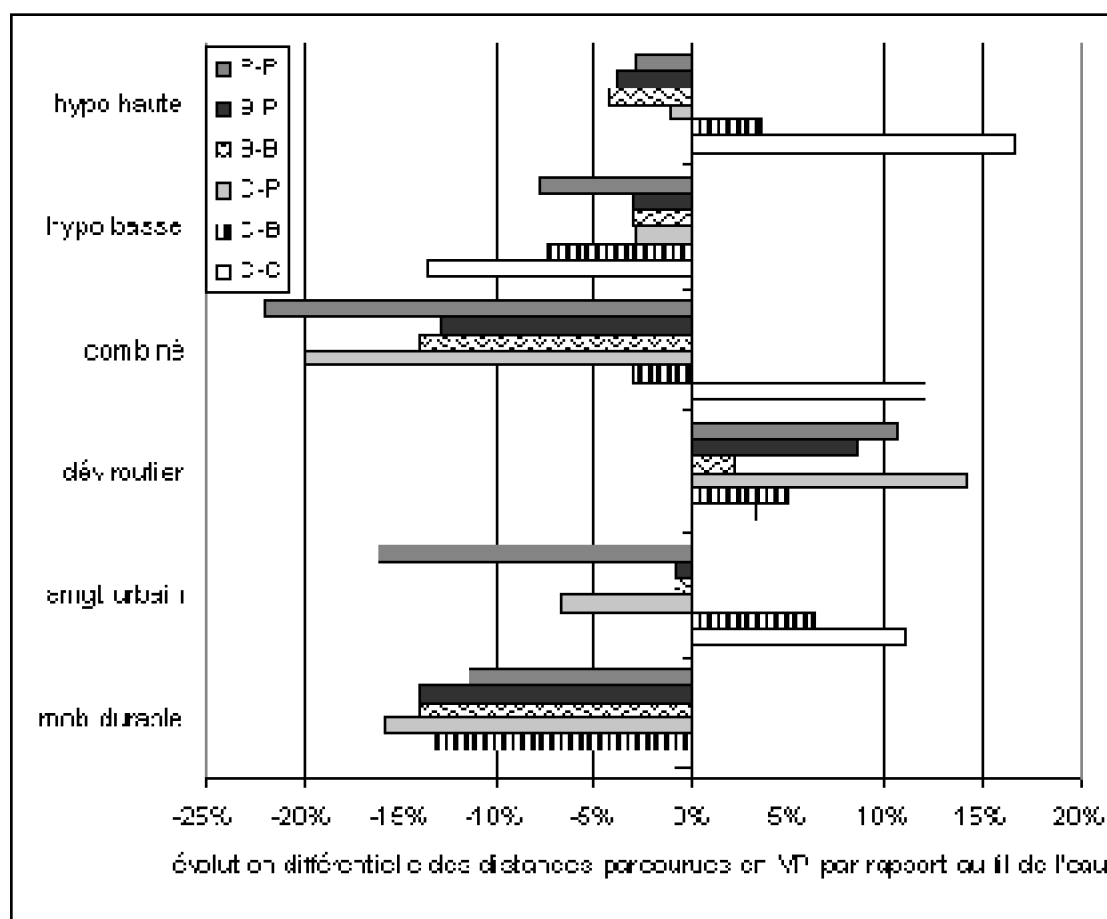
Le scénario de *mobilité durable* atteint ses objectifs dans la mesure où il permet une réduction des distances parcourues en voiture particulière par rapport à la simulation fil de l'eau plus que proportionnelle à la diminution du nombre de déplacements en véhicule particulier. La diminution du taux de croissance du revenu conduit également à une diminution des distances parcourues, cependant celle-ci est moins que proportionnelle à la diminution du nombre de voiture particulière constatée.

Tableau 6-67. Evolution différentielle des distances parcourues par rapport à la simulation fil de l'eau

	Mobilité durable	aménagement urbain	développement routier	combiné (1) et (2)	hypothèse basse	hypothèse haute
Centre - Centre	4%	11%	3%	12%	-14%	16%
Centre - banlieue	10%	6%	5%	-3%	-7%	4%
Centre - Périphérie	16%	-7%	14%	-20%	-3%	-1%
Banlieue - Banlieue	14%	-1%	2%	-14%	-3%	-4%
Banlieue - Périphérie	14%	-1%	9%	-13%	-3%	-4%
Périphérie - Périphérie	19%	-16%	11%	-22%	-8%	-3%
Aire totale	-12%	-3%	8%	-12%	-6%	1%



Graphique 6-. Evolution différentielle des distances parcourues en voiture particulière sur l'aire totale



Graphique 6-. Evolution différentielle des distances parcourues en voiture particulière sur les différentes liaisons géographiques

613. Les modifications des conditions d'accessibilité

Les conditions d'accessibilité de la population résidente aux emplois s'améliorent de la même façon pour la simulation *développement routier* et la simulation combinée des scénarios de mobilité durable et d'aménagement urbain (+9%). Cependant, ces améliorations ne résultent pas des mêmes phénomènes dans l'un et l'autre scénario. Dans le scénario *combiné*, c'est l'accessibilité de la population résidant dans le ville-centre et dans la couronne de banlieue qui s'améliore (respectivement de +14% et de +7%), alors que dans le scénario de *développement routier*, l'accessibilité augmente dans tous les secteurs et surtout dans la couronne de périphérie (+13%). En ce qui concerne les conditions d'accessibilité des activités induites à la population résidente, le même phénomène s'observe pour ces deux scénarios.

Le scénario de *mobilité durable* engendre une amélioration de l'accessibilité de la population aux emplois plus forte que celle observée dans le *scénario aménagement urbain*. C'est l'inverse qui est constaté pour les conditions d'accessibilité des activités induites à la population. Cela s'explique par une concentration plus importante des activités induites sur la ville-centre et la première couronne que la population.

Tableau 6-68. Variations des conditions de l'accessibilité de la population résidente aux emplois par rapport à la simulation fil de l'eau

	mobilité durable (1)	aménag ^t urbain (2)	dévelop ^t routier	combiné (1) et (2)	hypothèse basse	hypothèse haute
Centre	12%	2%	7%	14%	7%	-6%
Banlieue	4%	2%	10%	7%	6%	-8%
Périphérie	-3%	2%	13%	0%	5%	-8%
Total	6%	2%	9%	9%	6%	-7%

Tableau 6-69. Variations des conditions de l'accessibilité des activités induites à la population par rapport à la simulation fil de l'eau

	mobilité durable (1)	aménag ^t urbain (2)	dévelop ^t routier	combiné (1) et (2)	hypothèse basse	hypothèse haute
Centre	11%	14%	7%	25%	7%	-6%
Banlieue	0%	10%	18%	9%	8%	-8%
Périphérie	-4%	-1%	13%	-4%	2%	-4%
Total	3%	8%	12%	12%	6%	-6%

614. Les modifications de la répartition spatiale des résidents et des activités induites

Les modifications de la répartition spatiale de la population résidente par rapport à la simulation *fil de l'eau* sont minimales, excepté pour le scénario *aménagement urbain* et le scénario *combiné* où les modifications sont apportées de façon exogène au modèle (par

les hypothèses posées sur les taux de déformation de l'évolution de la répartition de la population, des emplois et des actifs). Si les amplitudes des variations sont minimales, le sens de celles-ci est toutefois correct.

Tableau 6-70. Evolution différentielle de la répartition spatiale de la population résidente par rapport à la simulation fil de l'eau

	mobilité durable (1)	aménag^t urbain (2)	dévelop^t routier	combiné (1) et (2)	hypothèse basse	hypothèse haute
Centre	0,4%	9,2%	-0,3%	9,6%	0,0%	0,2%
Banlieue	0,0%	1,4%	-0,2%	1,3%	-0,1%	0,1%
Périphérie	-0,5%	-13,1%	0,6%	-13,6%	0,1%	-0,4%
Total	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%

Les variations de la répartition spatiale des activités induites sont un peu plus prononcées. Le scénario de *mobilité durable* permet ainsi, par rapport à la simulation *fil de l'eau*, un plus fort développement de ces activités dans la ville-centre, et un développement moindre en couronne de banlieue et en couronne périphérique.

Tableau 6-71. Evolution différentielle de la répartition spatiale des activités induites par rapport à la simulation fil de l'eau

	mobilité durable (1)	aménag^t urbain (2)	dévelop^t routier	combiné (1) et (2)	hypothèse basse	hypothèse haute
Centre	1,1%	6,6%	-1,2%	-7,5%	0,1%	0,0%
Banlieue	-1,2%	-3,4%	3,5%	-4,7%	1,4%	-1,3%
Périphérie	-2,6%	-18,2%	0,9%	-19,9%	-1,4%	1,0%
Total	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%

62. Les principaux enseignements en matière de planification des transports

621. Le rôle de la variable revenu

Les simulations pratiquées mettent en exergue le rôle prépondérant du revenu. Il intervient en effet à de multiples niveaux dans le système des déplacements urbains. Tout accroissement du pouvoir d'achat des ménages se traduit par une hausse du taux de mobilité quotidienne motivée par le développement d'activités récréatives et personnelles. L'accroissement du pouvoir d'achat se traduit également par une hausse de l'acquisition et de l'usage de la voiture particulière, et conjointement par une diminution de la clientèle potentielle des transports collectifs. L'augmentation des déplacements motorisés crée une aggravation des conditions de circulation qui affecte l'organisation de l'offre de transport collectif de surface. Ces résultats soulignent les effets pervers d'une reprise économique durable sur l'organisation des transports urbains si l'on considère que les comportements individuels ne se modifient pas. Ce résultat est toutefois relativement connu et a déjà été mis en évidence par les modèles QUINQUIN (Tabourin, 1989 ; Bouf, 1989).

Les simulations entreprises permettent également de dégager des enseignements sur l'efficacité de certains leviers de commande.

622. Les effets d'une politique de restriction de l'usage de la voiture particulière

Le scénario visant à réduire l'usage de la voiture particulière s'appuie sur deux mesures restrictives : l'instauration d'un péage de cordon d'accès à la ville-centre, et le stationnement payant généralisé à toute l'aire de la ville-centre combiné à une diminution des capacités de stationnement sur cette même aire. Ces mesures sont associées à un développement de l'offre en transports collectifs.

Ces actions ont des répercussions directes sur les temps généralisés de déplacements en voiture particulière dans la mesure où elles occasionnent une augmentation du coût du déplacement sur les trajets routiers à destination de la ville-centre. Les déplacements internes à la ville-centre sont également pénalisés du fait du stationnement payant et de la diminution du nombre de places de stationnement qui engendre des temps de recherche d'une place de stationnement plus élevés.

Les mesures prises permettent d'infléchir la progression du nombre de déplacements en voiture particulière et d'augmenter le nombre de déplacements en modes légers et dans une moindre mesure en transports collectifs. La limitation des déplacements sur les liaisons radiales, dont une partie non négligeable relève des migrations alternantes domicile-travail, est un résultat intéressant car ce sont en effet les déplacements qui sont source de congestion aux entrées des agglomérations et consommateurs de ressources environnementales car ils occasionnent des distances parcourues importantes et donc des émissions polluantes. Les mesures de ce scénario permettent une diminution de la progression des distances parcourues par rapport à la simulation fil de l'eau.

Cependant, les résultats de la simulation de ce scénario donnent une lecture « toutes choses égales par ailleurs » en matière de l'évolution du contexte social. En particulier, le problème de l'acceptabilité du péage urbain n'est pas pris en compte. Dans le modèle, le principe comportemental conducteur est celui de la rationalité économique. Il repose sur le postulat que l'agent fonde ses pratiques quotidiennes de transport sur la base d'un choix économique rationnel.

Ces mesures de politiques de transport conduisent, tout en améliorant les conditions générales d'accessibilité de l'aire urbaine, à en modifier la configuration spatiale. Ainsi, les conditions d'accessibilité de la ville-centre sont fortement améliorées, ce qui n'est pas le cas pour les aires périphériques qui voient leur accessibilité diminuer. Ces modifications n'ont pas des effets très marqués sur l'évolution de la répartition des localisations des résidents et des activités induites. Un léger balancement par rapport à la tendance fil de l'eau se réalise dans le sens d'un mouvement de relocalisation dans la ville-centre et de délocalisation dans la couronne de périphérie.

623. Les effets non négligeables d'une politique de contrôle des localisations

Le scénario d'aménagement urbain induit à rééquilibrer le développement spatial de l'aire urbaine : une densification plus forte de la ville-centre et de la couronne de banlieue et *a contrario* un développement moins prononcé par rapport à la tendance fil de l'eau des couronnes périphériques.

La modification de la structure urbaine entraîne une progression plus favorable des déplacements en modes légers et en transports collectifs par rapport à la tendance fil de l'eau et une progression moins forte des déplacements en voiture particulière. L'augmentation du nombre de déplacements en modes légers s'explique par la densification en emplois et en populations de la ville-centre, et donc par des distances à parcourir sur ce secteur relativement plus faibles, ce qui engendre un terrain favorable pour la pratique de déplacements en modes légers. De la même façon, les espaces qui bénéficient d'un redynamisme sont les aires les mieux adaptées aux déplacements en transports collectifs, dans la mesure où elles présentent des densités relativement élevées.

Les mesures d'aménagement urbain conduisent à la réduction des distances parcourues en voiture particulière par rapport à la tendance fil de l'eau, mais dans une moindre mesure que ne le permettent les mesures de transport envisagées précédemment. Cela s'explique par, d'une part, le fait que le nombre de déplacements augmente dans la ville-centre et de ce fait les distances parcourues s'accroissent sur ce secteur, et d'autre part, les inflexions de la progression des déplacements sur les liaisons radiales sont moins prononcées que celles observées dans la simulation fil de l'eau, or ce sont justement des déplacements qui génèrent des distances parcourues importantes.

Ces mesures conduisent à infléchir les tendances qui contribuent à maintenir une certaine « dépendance automobile ». Elles ont en effet comme objectif d'infléchir la progression des facteurs à l'origine de la formation des « territoires de l'automobile » (Dupuy, 1995), à savoir le développement des espaces périurbains dans lesquels « l'automobile demeure pour le périurbain le *principal outil de transport* ».

624. Les effets des mesures restrictives de l'usage de la voiture particulière accompagnées par un développement spatial urbain maîtrisé

Les simulations du scénario *combiné* présentent les résultats les plus contrastés par rapport à la tendance fil de l'eau après ceux issus des scénarios de croissance économique. Le développement démographique et économique de la ville-centre et de la couronne de banlieue est relayé en effet par des mesures favorables à l'usage des transports collectifs et pénalisant l'usage de la voiture particulière.

625. Les effets pervers des mesures de développement routier

Le développement des capacités routières aux portes de l'agglomération et des capacités de stationnement dans la ville-centre a pour effet d'améliorer fortement les conditions d'accessibilité sur tous les secteurs. Cependant, ces mesures entraînent une dégradation de la situation socio-environnementale : les déplacements en voiture particulière progressent au détriment des modes légers et dans une moindre mesure des transports collectifs. Ces mesures conduisent également à une augmentation des distances

parcourues et donc à une dégradation du bilan environnemental. En outre, l'accroissement des conditions d'accessibilité favorisent plus fortement les espaces périphériques ce qui conduit à un phénomène de localisation dans ces espaces plus prononcé que dans la tendance *fil de l'eau*. Ces tendances sont favorables au renforcement des territoires de l'automobile et de la dépendance automobile.

63. Les enseignements méthodologiques sur le modèle : portées et limites

631. La portée du modèle

Le modèle élaboré visait à dépasser les lacunes de la méthodologie de modélisation des déplacements urbains. Les principaux reproches qui a été adressé aux modèles classiques tiennent à leur caractère trop statique, le fait qu'ils ne prennent pas en compte les interactions modales, et n'intègrent pas les rétroactions sur les choix de déplacements des modifications des temps généralisés de déplacement, de façon plus générale, ils n'intègrent pas la dynamique urbaine.

La mise en oeuvre des différents tests de sensibilité puis des simulations des scénarios contrastés permet d'étudier le comportement du modèle. Ces tests et simulations montrent un comportement raisonnable du modèle dans tous les cas. Tous les modules réagissent de façon correcte aux variations des paramètres et des variables de commande, y compris les modules de répartition spatiale de la population résidente et des activités induites. Les réponses de ces modules aux modifications des conditions d'accessibilité, bien que minimales, se réalisent de façon cohérente (c'est-à-dire dans un sens logique). Les différents tests permettent *in fine* de valider la structure globale du modèle.

La faisabilité pratique de notre démarche semble donc acquise. Le modèle élaboré permet d'envisager les futurs possibles du système des déplacements urbains, en simulant les conséquences de diverses politiques, en regard notamment des évolutions incertaines du contexte socio-économique qui sont tout à fait déterminantes.

Il y a donc adéquation du modèle aux objectifs qui lui étaient assignés. Le modèle de simulation élaboré représente un outil d'aide à la décision pertinent. Il permet de tester toute une palette d'actions de politique de transport et peut ainsi être le support à la mise en oeuvre d'actions stratégiques de long terme. Les simulations analysées dans ce présent chapitre ne représentent qu'une partie de l'éventail des simulations possibles.

632. Les critiques internes

La simulation des tests et des scénarios a démontré la pertinence globale du modèle, cependant certaines critiques internes peuvent être formulées.

Les modules de répartition spatiale de la population résidente et des activités induites réagissent de façon cohérente aux variations des conditions d'accessibilité. Cependant, l'intensité, qui paraît minime, des réactions ne peut pas être validée. En effet, les modules ont été calés sur des coupes transversales faute de disponibilité de séries temporelles adéquates. Cela renvoie à la difficulté méthodologique de calibrer la sensibilité de la

répartition spatiale aux modifications de l'accessibilité. Par ailleurs, le modèle s'appuie sur une représentation simplifiée de la réalité, lue à travers une conceptualisation du fonctionnement de la ville fondée sur l'interactivité du système des localisations, et du système des pratiques et relations sociales, du système des déplacements (Bonnafois, Puel, 1983). Nous devons souligner le caractère simplificateur des modules de répartition spatiale des résidents et des activités induites et leur faiblesse théorique. En effet, nous ne sommes pas parvenus à mener jusqu'au bout, c'est-à-dire jusqu'à la phase de la confrontation du modèle théorique aux données, le modèle de choix de localisation des résidents envisagé. Ce modèle s'appuyait sur des techniques de choix discrets. La constatation de la fragilité théorique de ce module ne doit cependant pas conduire au rejet du modal global puisque ce modèle a malgré tout démontré sa faisabilité pratique et surtout ses qualités dans la prise en compte des phénomènes de déplacements et des phénomènes urbains.

Le module de répartition modale entre les déplacements en voiture particulière et les transports collectifs n'est pas très sensible aux variations des conditions d'offre de transport. Les reports modaux s'effectuent davantage entre la voiture particulière et les modes légers.

Cependant, grâce à sa construction modulaire, chacun des modules peut être rectifié et amélioré sans que la structure globale du modèle ne soit remise en cause. La conception et la réalisation d'un modèle ne peut se concevoir de manière figée dans le temps. Le but d'un modèle est de présenter de manière simplifiée une certaine réalité, et ce de manière la plus pertinente qu'il soit. Le fait même que cette réalité soit variable, que certains éléments peuvent être occultés pendant un certain temps puis réapparaître, nécessite une adaptation continue du modèle. Il en va de même des demandes de sorties supplémentaires, nécessaires à l'appréhension du système qui n'auraient pas été prévues à l'origine et qui nécessitent pour être produites, l'introduction de nouvelles variables d'entrée explicatives.

633. Les critiques externes

Certains éléments participant au processus de choix du déplacement n'ont pas été pris en considération dans le modèle.

Ainsi, la question de la composante horaire des déplacements n'a pas été envisagée, c'est-à-dire que l'heure de départ du déplacement n'est pas un paramètre modélisé. Cependant, cette question a une temporalité de très court terme, la difficulté aurait été de combiner au mieux les exigences de détail de la représentation d'un tel choix en termes de techniques de modélisation à la ligne directrice de modélisation adoptée, à savoir une approche globale et stratégique.

Le problème des déplacements intermodaux n'est pas pris en considération. Ces déplacements combinent un mode de transport motorisé individuel avec un mode de transport collectif. Bien que cette pratique reste globalement marginale aujourd'hui (de l'ordre de 1% des déplacements dans les grandes agglomérations), elle peut être localement non négligeable. Surtout, elle est au coeur de plusieurs enjeux importants. En effet, l'incitation au rabattement sur les transports publics (gares en périphérie, stations

terminus en limite de zone dense) est un des principaux moyens d'adapter les déplacements aux nouvelles formes d'urbanisation et de limiter la place de la voiture en centre-ville. De plus, dans un contexte où la part des transports publics est souvent en baisse, les transports urbains en site propre et les tramways d'agglomération ne peuvent se passer du réservoir de clientèle en pleine expansion que constituent les zones périurbaines. L'intermodalité peut permettre d'optimiser leur usage, et donc d'augmenter leur autofinancement et d'améliorer leur rentabilité socio-économique.

D'autres éléments, non pris en considération, pourraient encore être cités. Néanmoins, ces différents éléments ne participent pas réellement de la problématique posée par le modèle.

Il reste cependant le problème de l'appréciation théorique de notre construction, c'est-à-dire la question de la confirmation théorique du modèle. La construction théorique du modèle reste perfectible, ainsi que son élaboration plus technique. Dans le cadre de la démarche opérationnelle qui était la notre, le choix de la spécification du modèle a été bien souvent contraint et dicté par la disponibilité des données plus que par l'adéquation théorique au problème posé.

Conclusion générale

En conclusion, nous rappellerons dans un premier temps l'objectif de notre travail. Nous indiquerons alors la démarche adoptée, puis présenterons les principaux résultats obtenus. Enfin, nous proposerons quelques orientations de recherche pour un approfondissement ultérieur.

1. Les objectifs de la recherche

Face à la crise des systèmes de déplacements urbains caractérisée par une situation croissante de congestion de la voirie urbaine provoquée par l'augmentation massive du trafic automobile associée à des difficultés croissantes de financement des investissements en transports collectifs, mode alternatif à la voiture particulière, il est indispensable de réfléchir à de nouvelles solutions pour améliorer l'organisation des déplacements urbains. Pour cela, de nouvelles orientations politiques sont à envisager. Elles doivent s'inscrire dans une démarche de politique globale des déplacements, c'est-à-dire considérer l'ensemble des modes de déplacement ainsi que leurs interactions. Par ailleurs, la politique des transports urbains ne peut plus être pensée à court terme. La démarche de planification doit être envisagée dans une perspective de long terme, ce qui implique qu'elle doit prendre en compte les influences réciproques de l'urbanisation et des déplacements. Elle doit donc pouvoir s'appuyer sur des outils de simulation adaptés à

cette exigence. Ainsi, notre objectif était l'élaboration d'un tel modèle ayant comme double objectif de simuler l'évolution du système des déplacements à un horizon de long terme en prenant en compte les influences réciproques de l'urbanisation et des déplacements, et de simuler les effets de politiques globales de transport.

2. La démarche adoptée

Afin de pouvoir répondre à la problématique, le modèle élaboré se devait de dépasser la démarche « classique » de la modélisation des transports urbains considérée comme trop statique et surtout n'abordant la causalité transport - urbanisation que dans un sens unique, à savoir celle de urbanisation vers les transports (dans ces modèles, la structure urbaine est une donnée et l'offre de transport n'interagit pas). L'élaboration du modèle s'est alors réalisée en deux temps. Dans un premier temps, différentes pistes théoriques sur les mécanismes d'interactions transport - urbanisation ont été étudiées. Puis, une revue méthodologique des modèles interactifs de transport et d'urbanisation a été proposée. Dans un deuxième temps, après avoir rappelé certains fondements théoriques de l'interaction transport - urbanisation et montré leurs insuffisances par rapport à la problématique posée, une phase d'élaboration d'un modèle interactif opérationnel de simulation des déplacements a été tentée.

Parmi les pistes théoriques sur les mécanismes d'interaction, les apports des modèles de la micro-économie ont été étudiés. Ces modèles se révèlent trop éloignés de la réalité urbaine pour être repris dans le cadre d'un modèle dont la visée est opérationnelle. En outre, il s'agit de modèles d'équilibre, de modèles statiques non adaptés à notre problématique. Néanmoins, la conclusion qualitative fondamentale que dégagent les modèles micro-économiques de localisation, à savoir, la liaison entre coût de transport et rente foncière, demeure fondamentale. La place centrale que ces modèles font jouer au transport et la description des mécanismes de calcul rationnel entrepris par les agents pour le choix de localisation sont des éléments essentiels de l'analyse.

La notion d'accessibilité ne présente pas véritablement une lecture causale des mécanismes d'interaction mais a l'intérêt de fournir une mesure synthétique et spatialisée des conditions de déplacements.

Les modèles d'interaction spatiale donnent une expression formalisée des échanges entre activités étant données les contraintes de transport. Ces modèles demeurent des modèles de représentation et leur pouvoir explicatif des mécanismes à l'oeuvre est faible.

Par ailleurs, si en France le type de modèle proposé dans notre thèse n'a pas été très développé, ces modèles ont été en revanche relativement bien déployés à l'étranger. Cela a donné lieu à une série de modèles visant à expliquer à la fois l'utilisation des sols et des flux de transport et pouvant être calés sur des situations réelles. Certains de ces modèles interactifs de transport et d'urbanisation ont fait leur preuve. Néanmoins, notre démarche n'a pas été d'appliquer une structure de modélisation existante. En effet, aucune ne semblait répondre réellement à notre problématique ou exigeait des données

statistiques non disponibles pour estimer les paramètres qu'ils comportent. Néanmoins, le modèle élaboré puise largement dans les principes des modèles existants.

C'est ainsi que la construction du modèle reprend les grands principes des modèles interactifs présentés dans le chapitre 3. Le principe directeur est le suivant : la répartition spatiale des résidents et des activités urbaines (les générateurs de la mobilité) conditionnent la formation des déplacements. Cette demande est confrontée aux conditions de l'offre physique de transport (infrastructures routières, offre de transports collectifs, conditions de compétitivité entre la voiture particulière et les transports collectifs), ce qui interfère avec la répartition modale des déplacements et l'affectation sur le réseau routier. Les temps généralisés de déplacements sont l'expression des conditions dans lesquelles se sont équilibrées l'offre et la demande de transport. Dans une perspective dynamique de long terme, perspective dans laquelle s'inscrit le modèle, les choix de déplacements (identifiés dans le modèle par les étapes de génération, distribution spatiale, répartition modale et affectation) ne sont pas figés. Ils peuvent être remis en cause lorsque les conditions de déplacements, en termes de temps généralisés, viennent à se modifier. La structure itérative en pas à pas (le temps est découpé en pas d'un an) permet d'introduire des « boucles rétroactives » qui expriment ce phénomène. *In fine*, les modifications des temps généralisés entraînent des variations des conditions d'accessibilité et à long terme des modifications de la répartition spatiale des résidents et des activités. Le modèle proposé présente donc une structure modulaire avec un module « développement urbain », un module « répartition spatiale de la population résidente et des activités induites » et un module « déplacements ».

Le module « déplacements » définit, à système d'offre de transport donné et à localisation des activités et des résidents donnée, les flux de déplacements pour chaque mode et les temps généralisés de transport. Ce module exprime « l'équilibre » du marché des transports urbains obtenu à travers les sous-modules de génération, distribution, répartition spatiale, et affectation.

Le module « développement urbain » est fondé sur le principe de la théorie de la base économique. Les activités basiques, dont le niveau et la localisation sont exogènes au modèle, conditionnent le développement de la population et des activités induites par le jeu de multiplicateurs.

Jusque-là aucune relation n'explique les localisations des activités ou des individus. C'est au module « répartition spatiale des résidents et des activités » de le faire. La spécification des modules de répartition spatiale de la population résidente et des activités induites est relativement sommaire. Elle vise à mesurer l'impact des facteurs de coûts des déplacements à travers les indicateurs d'accessibilité et de coûts immobiliers sur la répartition des résidents et des activités induites.

3. Les principaux résultats

La mise en oeuvre des différents tests de sensibilité aux variables d'entrée puis des

simulations de scénarios contrastés a montré un comportement raisonnable et cohérent du modèle : tous les modules réagissent de façon cohérente avec les variations des paramètres et des variables de commandes, y compris les modules de répartition spatiale de la population résidente et des activités induites ; les réponses de ces modules aux modifications des conditions d'accessibilité, bien que minimales, sont logiques. Les différents tests permettent *in fine* de valider la structure globale du modèle. La faisabilité pratique de notre démarche est donc acquise. Le modèle élaboré permet d'envisager des futurs possibles du système des déplacements urbains, en simulant les conséquences de diverses pratiques, en regard notamment des évolutions incertaines du contexte socio-économique qui sont tout à fait déterminantes. Il y a donc adéquation du modèle aux objectifs qui lui étaient assignés.

Les simulations pratiquées mettent en exergue le rôle prépondérant du revenu. Il intervient en effet à de multiples niveaux dans le système des déplacements urbains. Tout accroissement du pouvoir d'achat des ménages se traduit par une hausse du taux de mobilité quotidienne motivée par le développement d'activités récréatives et personnelles. L'accroissement du pouvoir d'achat se traduit également par une hausse de l'acquisition et de l'usage de la voiture particulière, et conjointement par une diminution de la clientèle potentielle des transports collectifs. Ces résultats soulignent les effets pervers d'une reprise économique durable sur l'organisation des transports urbains si l'on considère que les comportements individuels ne se modifient pas.

Les simulations entreprises ont permis également de dégager des enseignements sur l'efficacité de certains leviers de commande. Le modèle a été construit dans une optique d'aide à la décision. Les scénarios proposés se sont inscrits (excepté le scénario *développement routier*) dans une volonté de remédier à la crise des transports urbains (que nous pouvons caractériser par la hausse des déplacements en voiture particulière, la baisse inexorable de la part de marché des transports collectifs et leur conséquence sur les phénomènes de congestion).

Les solutions envisagées sont au nombre de trois :

Restreindre la mobilité en voiture particulière

La restriction de la mobilité en voiture particulière peut passer par différents leviers de commande : l'instauration d'un péage cordon d'accès à la ville-centre, le stationnement payant, la diminution des capacités de stationnement. La mise en oeuvre conjointe de ces trois mesures permet de ralentir la progression du nombre de déplacements en voiture particulière et surtout de ralentir l'accroissement des distances parcourues. L'efficacité de cette politique est essentiellement à imputer à la mise en place d'un péage urbain, et donc est soumise aux problèmes de l'acceptabilité politique d'une telle mesure, effet non pris en considération dans notre modèle.

Développer l'offre de transports collectifs

Des investissements massifs dans les transports collectifs (dans le modèle cela se traduit par la mise en place de douze lignes structurantes de transports en commun offrant une vitesse commerciale élevée) permet d'accroître la fréquentation des transports collectifs par rapport à la tendance fil de l'eau. L'efficacité de ces investissements reste néanmoins décevante au regard de leur importance. Associés à des mesures de restriction de l'usage de la voiture particulière, les investissements en transports collectifs sont alors plus à même d'être rentabilisés. Cela démontre qu'une politique d'investissement dans les transports en commun ne peut pas être raisonnablement menée sans penser à limiter l'usage de la voiture particulière sur les espaces où elle entre en concurrence avec les transports collectifs et où ces derniers peuvent être une alternative efficace à ce mode de déplacement individuel.

Aménager différemment l'espace urbain de façon à réduire, toutes choses égales par ailleurs, les distances parcourues.

La modification de la répartition spatiale de la population résidente et des activités économiques urbaines s'inscrivant dans un ralentissement de l'étalement urbain et une redynamisation de la ville-centre entraîne une modification de la répartition modale : favorable aux modes légers et aux transports collectifs et pénalisante pour la voiture particulière. L'augmentation du nombre de déplacements en modes légers s'explique par une densification en emplois et en population de la ville-centre et par des distances à parcourir sur ce secteur relativement plus faibles. De même, la densification de la ville-centre et de la couronne de banlieue génère une clientèle potentielle des transports collectifs plus importante étant donné que ces zones sont des lieux privilégiés du développement des transports collectifs, où ils peuvent être le plus compétitifs.

Les mesures d'aménagement urbain conduisent à la réduction des distances parcourues en voiture particulière par rapport à la tendance fil de l'eau. Elles permettent en effet d'infléchir les tendances qui contribuent à maintenir une certaine « dépendance automobile » (Dupuy, 1995), à savoir le développement des espaces périurbains dans lesquels « l'automobile demeure pour le périurbain le principal outil de transport ». Néanmoins, le scénario *mobilité durable* permet une réduction des distances parcourues supérieure. Cela s'explique, d'une part, par le fait que le nombre de déplacements croît dans la ville-centre, augmentant par conséquent les distances parcourues sur ce secteur et, d'autre part, par le fait que les inflexions de la progression des déplacements sur les liaisons radiales sont moins prononcées dans la simulation *aménagement urbain* que celles observées dans la simulation *mobilité durable*, or ce sont justement ces déplacements qui génèrent des distances parcourues importantes

Un dernier type de scénario, *développement routier*, a été simulé mettant en oeuvre le développement des capacités routières d'accès à l'agglomération ainsi que l'accroissement des capacités de stationnement dans la ville-centre. Les résultats de cette simulation confirment les effets pervers que l'on pouvait craindre de telles mesures. En effet, si ces actions entraînent un accroissement de l'accessibilité, celle-ci est surtout imputable à l'amélioration des conditions de circulation sur les liaisons d'échange avec la

ville-centre. Les conséquences directes sont un accroissement du nombre de déplacements en voiture particulière et, surtout, une forte augmentation des distances parcourues. Le bilan environnemental est donc dégradé. D'autant plus que les mesures d'investissement prises dans ce scénario ne sont pas exagérément élevées : elles consistent en un accroissement des capacités routières sur les liaisons d'échange avec la ville-centre. Un scénario mettant en oeuvre l'instauration d'une nouvelle rocade aurait certainement entraîné des effets encore plus marqués sur l'augmentation des distances parcourues. Cela illustre l'équilibre extrêmement fragile du système des déplacements urbains.

L'intérêt des résultats des simulations est de confirmer certaines hypothèses prospectivistes en matière de développement des systèmes de déplacements urbains (orientation des Plans de Déplacements Urbains). Ces différentes simulations ont ainsi permis d'apporter des éclairages sur les impacts des politiques de transport.

4. Les perspectives de recherche

Cette recherche doit être considérée comme exploratoire. Elle a montré la faisabilité de la démarche et son intérêt en termes d'outil d'aide à la décision pour la planification des transports.

Notre ambition était grande, et afin d'atteindre notre objectif, qui était la mise en oeuvre d'un modèle opérationnel, des hypothèses simplificatrices ont dû être posées et certaines ambitions théoriques ont dû être abandonnées. Tout au long de cette thèse s'est posé le problème de l'adéquation entre la pertinence théorique du modèle et l'estimation économétrique, contrainte par la disponibilité des données. Aussi, bien souvent, la construction du modèle a été contrainte et dictée par les données dont nous disposions. Les limites de nos travaux permettent d'envisager des perspectives de prolongement de recherche à plusieurs niveaux.

Les modules de répartition spatiale de la population résidente et des activités induites sont relativement frustrés. Ils ne représentent pas véritablement un processus de choix. En effet, les données dont nous disposions n'étaient pas en adéquation avec la complexité des modèles de choix discrets envisagés dans un premier temps. Dans le modèle, seuls les effets de délocalisations et de relocalisations induites par la modification des conditions d'accessibilité sont considérés. Cependant, il faut ajouter que les effets de long terme de ces relocalisations ne portent pas seulement sur une redistribution spatiale des agents et de leurs déplacements. Ils se traduisent également par une modification des prix, en particulier des rentes foncières, qui traduisent les nouvelles conditions de la concurrence pour l'occupation de l'espace. Dans le modèle, le jeu de la rente foncière n'est pas modélisé. Les prix immobiliers sont considérés comme des données d'entrée, ce sont des variables exogènes. Il serait facilement envisageable de mesurer l'impact, dans le modèle, de la modification des indicateurs des prix immobiliers. En revanche, la modélisation du fonctionnement du marché foncier ou plus précisément la modélisation économique de la rente foncière est une tâche extrêmement délicate dans le cadre d'un

modèle opérationnel. Cette difficulté est en partie liée au manque de données sur les prix fonciers et immobiliers et au problème de la forte intervention publique sur le marché des logements. L'appréhension des liens entre transport et valeurs foncières pourrait passer par l'approche de la capitalisation immobilière. Cette voie consisterait à explorer plus précisément la formation et l'évolution des prix fonciers. Son principe est de déterminer la relation qui existe entre les attributs caractérisant un bien immobilier (ou foncier) et la valeur de ce bien pour les différentes catégories d'agents. Une partie importante des attributs pris en compte sont des aménités et des degrés d'accessibilité aux équipements de voisinage, qui sont fortement influencés par les infrastructures de transport⁴⁶. Pour chacun d'entre eux, l'estimation des relations déterminant les dispositions à payer permet, par catégorie d'agent, de calculer son prix implicite. L'intégration d'une telle approche nécessitera toutefois un certain nombre de remaniements du modèle, notamment la prise en considération de différents types d'agents économiques et donc la désagrégation de la demande de déplacements. Celle-ci n'a en effet été décomposée qu'en fonction du type de déplacement réalisé, c'est-à-dire en fonction des motifs de déplacements.

Le chapitre introductif de cette thèse a mis en évidence que le périmètre pertinent d'analyse des déplacements n'était plus la ville ou son agglomération mais toute l'aire urbaine environnante. Nous avons défini le périmètre d'application du modèle comme l'espace étant sous l'influence du pôle lyonnais (cette influence étant mesurée par les migrations alternantes). Cependant, ce périmètre recouvrait des espaces non renseignés par les « enquêtes ménages » de déplacements. Un lourd travail de reconstitution des données a alors été entrepris afin d'estimer la matrice O-D des déplacements sur cet espace. Toutefois, la forte hétérogénéité des données nous a conduit à modéliser de façon différente les déplacements selon les deux périmètres. Cette faiblesse des données nous a contraint à appauvrir les modules de simulation, ceux-ci n'étant pas dynamisés sur cet espace. Cette lacune est regrettable, car si les déplacements des espaces périurbains lointains sont pris en compte dans le modèle, ils ne sont toutefois pas pleinement intégrés. Or ces espaces périurbains et les déplacements qu'ils génèrent sont de véritables enjeux. De réels efforts doivent être entrepris afin d'avoir une connaissance statistique plus importante de ces déplacements.

Les résultats du modèle ne présentent pas d'indicateurs de congestion. En effet, le type de modèle d'affectation envisagé et la représentation du réseau d'infrastructures adoptée ne permettent pas de construire des indicateurs de congestion pertinents. Néanmoins, de tels indicateurs ne sont pas indispensables à la démarche globale, qui est de simuler les avenir possibles des déplacements urbains. Le modèle n'est en effet pas destiné à évaluer le dimensionnement de la voirie. Il fournit des conditions globales de déplacements, qui peuvent être l'expression d'un déséquilibre entre l'offre et la demande de capacité.

Les sorties du modèle ne permettent pas, dans l'état, de dresser un bilan environnemental des politiques testées. Or, dans le cadre de la problématique du développement durable, l'étude des relations entre transport et environnement est incontournable. Toutefois, cette relation ne peut être envisagée sans avoir préalablement

⁴⁶ Cela reviendrait à intégrer les résultats méthodologiques de la thèse de Beckerich (2000) dans ce travail.

mieux saisi les liens entre transport et urbanisation, ce qui était le but de notre travail. C'est pourquoi, la modélisation de la relation entre transport et environnement n'a pas été une priorité. Cependant, un module d'évaluation des émissions polluantes et des consommations énergétiques pourrait être intégré en aval du modèle. Il existe deux principaux facteurs d'évolution des nuisances, à savoir d'une part la croissance des trafics (son niveau, son volume en termes de distances parcourues) qui, toutes choses égales par ailleurs, pousse à une dégradation de la situation, et d'autre part, l'évolution des technologies des véhicules en circulation, qui tente au contraire, de répondre aux dysfonctionnements constatés. Ainsi, dans un premier temps, sur la base de l'estimation de la constitution du parc de véhicule sur l'aire d'étude envisagée, toutes choses étant égales par ailleurs, les émissions polluantes pourraient être calculées à partir des sorties existantes du modèle. Ce calcul pourrait se faire par liaison pour chacun des polluants en fonction des distances parcourues par les trafics en voiture particulière en heure de pointe du matin. Ce calcul resterait relativement grossier dans la mesure où le module d'affectation ne décrit pas de façon précise le réseau routier. Il aurait cependant l'intérêt de donner une mesure globale de l'impact des politiques en termes d'émissions polluantes et de consommations énergétiques. Cela permettrait de comparer les différents scénarios sur la base de ce « critère environnemental ». En ce qui concerne le deuxième facteur d'évolution des émissions polluantes, à savoir les mutations technologiques du parc de véhicule, sa prise en compte nécessite un travail plus important puisqu'elle réclame une projection des comportements d'équipement et de motorisation. Des travaux ont été menés à ce sujet à l'INRETS, notamment par C. Gallez (1995).

Pour finir, le modèle a été construit pour être un instrument d'aide à la décision et à l'orientation des stratégies de politiques urbaines. A ce titre, il peut ainsi se révéler un outil utile à l'évaluation économique des projets. Un rapport du ministère de l'équipement, des transports et du logement de 1997 soulignait la difficulté de l'évaluation économique des projets de transports urbains du fait de la spécificité du milieu urbain. Ce rapport mettait en effet en évidence le fait que les méthodes coûts - avantages habituelles dans les projets interurbains s'appliquent mal aux projets urbains. Outre des raisons d'ordre institutionnel, il existe des raisons d'ordre économique tenant à ce que les hypothèses de cette analyse sont moins bien satisfaites en milieu urbain où l'on rencontre des niveaux de congestion plus élevés, des rendements croissants et des externalités d'agglomération, des externalités d'environnement importantes, des interactions fortes entre les transports, l'utilisation des sols et l'évolution des systèmes urbains. A partir de ce constat, certaines priorités ont été dégagées concernant notamment le développement des connaissances sur les conséquences des modifications du système de transport sur la nature et la répartition des activités urbaines. La méthode usuelle d'évaluation économique fondée sur le calcul du surplus de l'utilisateur comporte dans ce sens de nombreuses imperfections car elle raisonne à localisations fixées, et ne prend pas en compte la dynamique des relocalisations. Le modèle élaboré dans notre thèse permet, dans une certaine mesure, de palier cette difficulté car les résultats des simulations intègrent les effets des interactions entre transport et urbanisation en amont de la procédure d'évaluation économique. Le modèle de simulation doit cependant être considéré comme un outil au service de l'évaluation économique et ne doit certainement pas s'y substituer. Ainsi, si par exemple le modèle de simulation montre que certaines infrastructures conduisent à un

épanouissement spatial de l'urbanisation, le modèle ne permet pas en tant que tel d'évaluer l'intérêt ou non d'une telle mesure. C'est aux méthodes d'évaluation de l'utilité économique et environnementale de le dire. Ainsi, envisager, en aval du modèle, un module de calcul économique permettrait d'apporter une forte valeur ajoutée à la démarche. Les sorties du modèle sont d'ores et déjà susceptibles d'alimenter l'évaluation des avantages des usagers (en termes de gains de temps) ou l'évaluation des gains et des pertes pour la collectivité, notamment en matière de bilan environnemental (cf. plus haut). En revanche, le modèle ne renseigne pas sur les coûts impliqués par les mesures mises en oeuvre (coût d'investissement, coût de fonctionnement). Aussi, il serait utile de mettre en regard les avantages et les coûts de ces mesures. Au final, les sorties de ce modèle peuvent permettre d'enrichir en amont la procédure d'évaluation économique sans en modifier les principes.

En conclusion, le modèle proposé est évidemment perfectible, en particulier dans son approche théorique. Mais compte tenu de l'intégration de plus en plus forte des politiques de transport et d'urbanisme, nous pouvons espérer que l'usage d'un tel type de modèle sera d'une utilité croissante pour les prises de décision. Tout au long de ce travail nous avons déploré le manque de données statistiques répondant à nos besoins de modélisation et nous contraignant à des spécifications théoriques simplifiées. Nous pouvons tout de même espérer que la réalisation de ce type de modèle d'interaction permet de préciser ces besoins en bases de données et de poursuivre, de façon progressive mais persévérante, l'ambition d'une meilleure compréhension des dynamiques urbaines.

Références bibliographiques

- Abrahamsson T.** (1996), Network equilibrium approaches to urban transportation markets - combined models and efficient matrix estimation, Royal Institute of Technology, Stockholm, 237 p.
- Alonso W.** (1964), Location and land use, Harvard University Press, Cambridge Press.
- Amano, Fujita** (1970). A long run economic effect analysis of alternative transportation facility plans. Journal of Regional Science.
- Anas A.** (1981). The estimation of multinomial logit models of joint location and mode travel choice from aggregated data. Journal of Regional Science, 21, 223-242.
- Anas A.** (1982). Residential location markets and urban transportation. New York : academic Press. (NP)
- Anas A.** (1983), « Discrete choice theory, information theory and the multinomial logit and gravity models », Transportation Research B, vol. 17B, n°1, pp. 13-23.
- Anas A.** (1995). « Capitalization of urban travel improvements into residential and commercial real estate : simulations with a unified model of housing, travel mode and shopping choices ». Journal of Regional Science, Vol. 35, N°3, pp. 351-375.
- Anas A., Moses L.** (1979), « Mode choice, transport structure and urban land use », Journal of urban economics 6, pp. 228-246.
- Anas A., Shyong Duann L.** (1985). Dynamic forecasting of travel demand, residential location and land development : policy simulation with the Chicago area transportation/land use system. Papers, Regional Science Association, 56, 38-58.
- Andan O, et alii** (1988). Mobilités et systèmes de transport dans les espaces périurbains. Mobilités et espaces périurbains, analyse bibliographique, Lyon, LET, Rapport pour CGP, CETUR et SYTRAL, février 1988, 89 p. + annexes.
- Andan O. et alii** (1999), Stratégies de localisation résidentielle des ménages et mobilité domicile-travail. Rapport final, Programme de recherche transports terrestres 1996-2000, Direction de la recherche et des Affaires Scientifiques et Techniques, Décision d'aide à la recherche N°96 MT 21, Lyon, LET, 170 p.
- Andan O. Faivre d'Acier B., Raux C. et alii** (1989), Mobilité résidentielle, activités et espaces fréquentés en milieux périurbains. Enquête en périphérie de Lyon, Lyon, LET, 200 p. + annexes.
- Anderstig C., Mattson L.G.** (1991), « An integrated model of residential and employment location in a metropolitan region », Papers in Regional Science, Vol. 70, N°2, pp. 167-184.
- Anderstig C., Mattson L.G.** (1994), Modelling land-use and transport interaction : evaluation and policy analyses, Royal Institute of Technology, Stockholm, 26 p.
- Balavoine E.** (1981). La prévision de la demande de transports urbains. Thèse d'Etat en Sciences Economiques, Université de Bordeaux 1, Bordeaux.
- Bates J., Brewer M., Hanson P., McDonald D., Simmonds D.** (1993). « Building a strategic model for Edinburgh ». PTRC.
- Beaucire F.** (1985), « La « déconcentration urbaine » : de nouveaux besoins de déplacements ». Transports Urbains, n°56, pp. 5-11.

- Beaucire F.** (1996), Les transports publics et la ville, Editions Milan.
- Beckerich C.** (1997), « Les prix des biens immobiliers et l'offre de biens publics locaux : un état de l'art de la capitalisation ». XXXIII ème Colloque de l'ASRDLF - Renouveau régional - Renouveau urbain, Lille 1-3 septembre.
- Beckerich C.** (2000), Biens publics et valorisation immobilière. Thèse pour le Doctorat de Sciences Economiques, Mention Economie des Transports, Université Lumière Lyon 2, Lyon.
- Beelsley M.E., Kemp M.A.** (1987). « Urban transportation », in MILLS E.S. (eds) Handbook of regional and urban economics - Volume II : Urban economics. Elsevier Science Publishers B.V. PP. 1023-1049.
- Ben-Akiva M., Lerman S.** (1985). Discrete choice analysis. Theory and application to travel demand. The MIT Press, England.
- Ben-Akiva M., Lerman S. R.** (1979). « Disaggregated travel and mobility-choice and measures of accessibility ». in HENSHER D.A., STOPHER P.R. (Eds), Behavioral travel modelling. Croom Helm, London, pp. 654-679.
- Berechman J.** (1980), « A general framework for the integration of land-use model a transportation model component », Journal of Regional Science, Vol. 20, N°1.
- Berechman J., Small K.A.** (1988), « Research policy and review 25. Modeling land use and transportation : an interpretative review for growth areas », Environment and planning A, 1988, volume 20, pp. 1285-1309.
- Bjurklo L.G.** (1995), Assessing methods to estimate delivery flows and the ERG model, Royal Institute of Technology, Stockholm, 323 p.
- Boiteux M.** (1994), Transports : pour un meilleur choix des investissements, Commissariat général du Plan, La Documentation Française, Paris, 128 p.
- Boniver V.** (1979). « Un aperçu de la nouvelle microéconomie urbaine », Revue d'économie régionale et urbaine, décembre 1979, N°3/4, pp 326-361
- Bonnaïfous A.** (1972). La logique de l'investigation économétrique. Thèse pour le Doctorat ès-Sciences Economiques, Université Lumière Lyon 2, Lyon.
- Bonnaïfous A.** (1976). « La demande de transports de voyageurs en milieu urbain, méthodologie de l'analyse et de la prévision ». CEMT, Table Ronde 32, Paris.
- Bonnaïfous A.** (1989), Le siècle des ténèbres de l'économie, Economica, Paris, 1989.
- Bonnaïfous A.** (1993), « Prospective de la mobilité urbaine ». in Bonnaïfous A., Bussièrre Y (eds). Transport et étalement urbain : les enjeux. Programme Rhône-Alpes, Recherches en Sciences Humaines, Les chemins de la recherche, Oullins.
- Bonnaïfous A., Plassard F., Soum** (1975). « Impact des investissements infrastructurels sur le développement industriel ». C.E.M.T., Table Ronde N°25, Paris.
- Bonnaïfous A., Puel H.** (1983). Physionomies de la ville. Les éditions ouvrières, Série « Initiation Economique », Paris, pp.157.
- Bonnaïfous, A.** (1993) « Prospective de la mobilité urbaine ». in Bussièrre Y., Bonnaïfous A. (eds). Transport et étalement urbain : les enjeux. Programme Rhône-Alpes, Recherches en Sciences Humaines, Les chemins de la recherche, Oullins.
- Bouf D.** (1989). Un nouvel instrument pour le dialogue stratégique entre la RAPT et ses

partenaires : le modèle GROSQUINQUIN. Thèse d'Université pour le Doctorat de Sciences Economiques, Université Lumière Lyon 2, Lyon.

Bouyaux P. (1988), « Modélisation désagrégée de la demande de transport urbain : une application à la ville de Rennes ». Revue d'Economie Régionale et Urbaine, n°5, pp. 783-809.

Bovy P.-H. (1999), « Structure urbaine et répartition modale, tendances globales et effets sur les transports publics », Transport Public International, Vol. 48, n°1/1999, pp. 8-15.

Boyce D., Mattsson L.G. (1996), « Formulation and solution of IMREL as a network equilibrium model », 43 rd North American Meetings Regional Science Association International, Arlington, Virginia, Nov. 14-17.

Bruneau C. (1996), « Analyse économétrique de la causalité : un bilan de la littérature ». Revue d'économie politique, 106, (3), mai-juin 1996.

Button K.J. (1993), Transport economics, second edition, Edward Elgar Publishing Limited, England, 262 p.

Buyaux P. (1988), « Modélisation désagrégée de la demande de transport urbain : une application à la ville de Rennes », Revue d'Economie Régionale et Urbaine, n°5, 1988.

Camagni R. (1996). Principes et modèles de l'économie urbaine. Bibliothèque de Science Régionale, ASRDLF, Economica, Paris, 377 p.

Cancallon F., Gargaillo L. (1989), Les politiques des transports collectifs urbains, Thèse de Doctorat ès-Sciences Economiques, Université de Lyon 2.

Capozza D. (1973), « Subways and land use », Environment and Planning, n°5, pp. 555-570.

CEMT (1976), La demande de transports de voyageurs en milieu urbain : méthodologie de l'analyse et de la prévision, Table ronde n°32, Paris, 4 et 5 mai 1975, Conférence Européenne des Ministres des Transports, Paris : OCDE, 95 p.

CEMT (1981), Bilan de la modélisation de la demande : confrontation prévisions / Résultats dans les transports urbains et interurbains, Table Ronde n°58, Paris 25 et 26 juin 1981, Conférence Européenne des Ministres des Transports, Paris : OCDE, 181 p.

CEMT, OCDE (1995), Transports urbains et développement durable, OCDE, Paris, 266 p.

CERTU (1998), Comportements de déplacements en milieu urbain : les modèles de choix discrets - Vers une approche désagrégée et multimodale. Dossier CERTU n°81, DDE, CERTU, ADEME, 133 p.

Chausse A. (1996). Le prix de la mobilité urbaine. Thèse de Doctorat de Sciences Economiques, Economie des Transports, Université Lumière Lyon 2, 339 p.

Coombe D. (1991). « Pratical urban transport strategy development ». Traffic engineering + Control, avril 1991, pp. 176-185.

Crecy R. (1979). « Quelques réflexions sur l'accessibilité ». Les cahiers scientifiques de la revue transport. 4ème trimestre.

De la Barra T. (1989). Integrated land use and transport modelling - Decision chains

and hierarchies. Cambridge Urban and Architectural Studies. Cambridge University Press, Great Britain, 167 pp.

- De Palma A., Lefevre C.** (1985), « Residential change and economic choice behavior », *Regional Science and Urban Economics*, 15, 1985, pp. 421-434.
- De Palma A., Marchal F.** (1996), « Métropolis : un outil de simulation du trafic urbain », *Transports*, n°378, juillet-août, pp. 304-315.
- De Palma A., Thisse J.F.** (1989), « Les modèles de choix discrets », *Annales d'Economie et de Statistique*, N°14, Avril-Juin, pp. 151-190.
- DeFerranti M., Mills E.** (1971), « Market choices and optimum city size, *American Economic Review Papers*, n°61, pp. 360-365.
- Derycke P.H.** (1982). *Economie et planification urbaines - Tome 2 : Théories et modèles*. Collection Themis Sciences Economiques. PUF : Paris.
- Derycke P.H., Gannon F.** (1990). « Distance et coûts de transports. Quelques réflexions sur les politiques de réduction de la congestion urbaine », *Revue d'Economie Régionale et Urbaine*, N°2.
- Derycke, P. H.** (1979) *Economie et planification urbaine*, tome 1. Paris. PUF, 406p.
- Dixit A.** (1973), *The Optimum factory town*, *Bell Journal of Economic and Managerial Science*, Vol. 4, pp. 637-651.
- Domencich, T.A., McFadden, D.L** (1975) *Urban travel demand : a behavioral Analysis*. North-Holland, Amsterdam
- Drewe P.** (1975), « Incidence de la structure et de l'étendue du développement urbain sur le choix des modes de transport : le cas des villes de moyenne importance », *CEMT*, table ronde 28.
- Duchier D.** (1991). *Revue méthodologique des modèles interactifs de localisation des activités et de transport*. Mémoire pour le D.E.A. d'Economie des Transports, LET.
- Dupuy G.** (1975). *Une technique de planification au service de l'automobile : les modèles de trafic urbain*, Document de travail, Action concertée de recherches urbaines, Paris : Copédith, 1975, 203 p.
- Dupuy G.** (1995). *Les territoires de l'automobile*. Anthropos-Economica, Paris.
- Dupuy G.** (1999). *La dépendance automobile - symptômes, analyses, diagnostic, traitements*. Anthro-Economica, Paris, 160 p.
- Echenique M.H., Flowerdew D.J., Hunt J.D., Mayo T.R., Skidmore I.J., Simmonds D.C.** (1990). « The MEPLAN models of Bilbao, Leeds and Dortmund », *Transport Reviews*, Volume 10, N°4, Oct-Dec, 309-322.
- Eliasson J., Mattsson L.G.** (1997), *TILT - a model for integrated analysis of household location and travel choices*, Royal institute of technology, Stockholm.
- Erlander S., Stewart N.F.** (1990), *The gravity model in transportation analysis - theory and extensions*, VSP, Utrecht, The Netherlands, 219 p.
- Evans A.W.** (1985), *Urban economics*, Blackwell Publishers, Oxford, 215 p.
- Frybourg M.** (1991), *Enseignement supérieur de transport*, Tome 2, Conservatoire national des arts et métiers, Paradigme, Caen.
- Fujita M.** (1985). *Towards general equilibrium models of urban land use*. *Revue*

Economique, N°1.

Fujita M. (1989), Urban economic theory, Cambridge, Cambridge University Press, 366 p.

Fujita M., Ogawa F. (1982). Multiple equilibria and structural transition of non-monocentric urban configuration. Regional Science and Urban Economics. 161-196.

Fujita M., Ogawa F. (1989). Nonmonocentric urban configuration in a two-dimensional space. Environnement and planning A, 21, 363-374.

Fustier B. (1988). « Les interactions spatiales », in Ponsard Claude. Analyse économique spatiale. P.U.F., Paris.

Gallez C. (1995), « Une nouvelle perspective pour la projection à long terme des comportements d'équipement et de motorisation », Recherche, transports et sécurité, n°48, septembre 1997, pp. 3-14.

Gallez C., Orfeuil J-P., Polacchini A. (1997), « L'évolution de la mobilité quotidienne. Croissance ou réduction des disparités ? », Recherche, transports et sécurité, n°56, juillet-septembre 1997, pp. 27-42.

Gannon F. (1992). Modèles de la ville et politiques urbaines optimales, Thèse pour le Doctorat ès Sciences Economiques, Université Paris X Nanterre, Paris.

Gärling T., Laitila T., Westin K. (Eds) (1998), Theoretical foundations of travel choice modeling, Oxford : Elsevier Science Ltd, 478 p.

Godard X. (1981), « La modélisation de la demande en transport collectif urbain » in CEMT, Bilan de la modélisation de la demande : confrontation prévisions / Résultats dans les transports urbains et interurbains, Table Ronde n°58, Paris 25 et 26 juin 1981, Conférence Européenne des Ministres des Transports, Paris : OCDE, 181 p.

Goffette-Nagot T F. (1994). Analyse micro-économique de la périurbanisation : un modèle de localisation résidentielle. Document de recherche N°43 (Série Thèse). INRA, Dijon, 338 p.

Gonzalez R. (1997), « The value of time : a theoretical review », Transport Reviews, Vol . 17, N°3, pp. 245-266.

Greene W.H. (1997), Econometric analysis, third edition, Prentice-Hall, Inc. New Jersey .

Guerrien B. (1989), La théorie néo-classique - Bilan et perspectives du modèle d'équilibre général, Economica : Paris, 3^e édition.

Guiliano G. (1989), « Research policy and review 27. New directions for understanding transportation and land use », Environment and Planning A, 1989, volume 21, pp. 145-159.

Hansen W. G. (1959). « How accessibility shapes land-use », Journal of the American Institute of Planners, 25, pp. 73-76.

Hanson S. (ed.) (1995), The geography of urban transportation, Second edition, The Guilford Press, New-York, 469 p.

Hartwick J., Schweitzer U., Varaiya P. (1976), Comparative statics of a residential economy with several classes, Journal of Economic Theory, 13, pp. 396-413.

- Hayashi Y., Roy J.** (1996). Transport, land use and the environment. Kluwer Academic Publishers. The Netherlands, 420 pp.
- Hubert J.** (1994), « Services et espace », in Bonamy J., May N (Eds), Services et mutations urbaines. Questionnements et perspectives. Economica - Anthropos, Paris, 283 p.
- Illeris S.** (1994), « La localisation des producteurs et des utilisateurs de services », in Bonamy J., May N (Eds), Services et mutations urbaines. Questionnements et perspectives. Economica - Anthropos, Paris, 283 p.
- Jayet H.** (1993), Analyse spatiale quantitative, une introduction, Association de Science Régionale de Langue Française, Bibliothèque de Science Régionale, Economica, Paris, 196 p.
- Johnston J.** (1988), Méthodes économétriques, tome 2 - 3^{ème} édition, Paris, Economica, 648 p.
- Jones D., May T., Wenban-Smith A.** (1990). « Integrated transport studies : lessons from the Birmingham study ». Traffic engineering + control, novembre 1990, pp. 572-576.
- Jouvaud M.** (1996), « Croissance économique des agglomérations et renouvellement de leur base économique », XXXII^{ème} Colloque de l'ASRDLF, Berlin.
- Kain J.F.** (1987). « Computer simulation models of urban location ». in MILLS E.S. (eds) Handbook of regional and urban economics - Volume II : Urban economics. Elsevier Science Publishers B.V, pp. 847-875.
- Kanafani A.** (1983), Transportation demand analysis, McGraw-Hill Book Company, New-York, 316 p.
- Kaufmann V.** (2000), Mobilité quotidienne et dynamiques urbaines, la question du report modal. Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne, 252 p.
- Kennedy P.** (1996), A guide to econometrics, third edition, The MIT Press , Cambridge, Massachusetts.
- Kerlsson S., Svalgard S .** (1993). « Synergetic - a new travel demand and lan-use model for the Stockholm, integrated with EMME/2 ». PTRC
- Koenig G.** (1974). « Théorie économique de l'accessibilité urbaine ». Revue Economique, N°2.
- Koenig G.** (1979). « A propos de : « Quelques réflexions sur la notion d'accessibilité » ». Les cahiers scientifiques de la revue transport. 4^{ème} trimestre.
- Lancaster K.J.** (1966), « A new approach to consumer theory », Journal of Political Economy, 74, April, pp. 132-156.
- Le Nir M.** (1991). Les modèles de prévision de déplacements urbains, thèse d'université, spécialité sciences économiques, option économie des transports, Université Lumière Lyon 2, Lyon.
- Lee D.** (1994), « Retrospective on large-scale urban models », Journal of the American Planning Association, Vol. 60, N°1, Winter 1994.
- Lee, D .** (1973) « Requiem for large models », Journal of the American Institute of Planners, N°39, pp. 163-178.

- Legey L., Ripper M., Varaiya P.** (1973), « Effects of congestion on the shape of a city, Journal of Economic Theory, n°6, pp. 162-179.
- Lesourne J.** (1985), « Les infrastructures de transport et la localisation des agents économiques : quelques évidences », Revue Economique, n°1, janvier 1985, pp. 169-214.
- Leurent F.** (1995), « Un algorithme pour résoudre plusieurs modèles d'affectation du trafic : la procédure d'égalisation par transvasement », Les Cahiers Scientifiques du Transport, N°30.
- Leurent F.** (1995), « Une boîte-à-outils pour opérer diverses affectations statistiques du trafic routier ». Rapport INRETS N°198, avril 1995, INRETS, Arcueil.
- Leurent F.** (1997). Analyse et mesure de l'incertitude dans un modèle de simulation, Thèse de Doctorat de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, spécialité transport, Paris, 297 p.
- Lichère V., Raux C.** (1998), Développement d'un modèle stratégique de simulation des déplacements - Présentation générale. Rapport pour le compte de la DRAST, du Grand Lyon, Conseil général, SYTRAL. Laboratoire d'économie des transports, SEMALY, Lyon, 181 p.
- Livesey D.** (1973), « Optimum city size : a minimum congestion cost approach, Journal of Economic Theory, n°6, pp. 144-161.
- Lowry I.S** (1964). A model of metropolis. Santa Monica, CA : Rand Corporation.
- Mackett R.L.** (1990), « Comparative analysis of modelling land-use transport interaction at the micro and macro levels », Environment and Planning A, 1990, volume 22, pp. 459-475.
- Mackett R. L.** (1990). « The systematic application of the LILT model to Dortmund, Leeds and Tokyo », Transport Reviews, Volume 10, N°4, Oct-Dec, pp. 323-338.
- Mackett R. L.** (1991). « A model-based analysis of transport and land-use policies for Tokyo », Transport Reviews, Volume 11, N°1, pp. 1-18.
- Mackett R.L.** (1991). « LILT and MEPLAN : a comparative analysis of land-use and transport policies for Leeds », Transport Reviews, Volume 11, N°2, 131-154.
- Mackett R. L.** (1992), « Policy analysis using a microsimulation model of land use and transport systems », Selected Proceedings of the Sixth World Conference on Transport Research, Volume I, Lyon.
- Mackett R.L.** (1993). « Structure of linkages between transport and land use », Transportation Research - B, Vol. 27B, N°3, pp. 189-206.
- Maddala G.S.** (1987), Econometrics, McGraw-hill book company, Singapore.
- Madre J-L., Maffre J.** (1997), « la mobilité des résidents français. Panorama général et évolution », Recherche, transports et sécurité, n°56, juillet-septembre 1997, pp. 9-26.
- Malinvaud E.** (1992), Leçons de théorie microéconomique, Collection Modules Economiques, Dunod : Paris, 4^e édition.
- Manheim M.** (1979) Fundamentals of transportation systems analysis, The MIT Press, Cambridge.
- Martinez F.J.** (1992), « The bid-choice land-use model : an integrated economic

- framework », *Environment and Planning A*, 1992, volume 24, pp. 871-885.
- Martinez F.J.** (1992). « Toward the 5-stage land-use transport model ». *Selected Proceedings of the Sixth World Conference on Transport Research, Volume I*, Lyon.
- Martinez F.J.** (1995). « Access : the transport-land use economic link ». *Transportation Research*, Vol. 29 B, N°6, pp. 457-470.
- Martinez F.J.** (1996). « Analysis of urban environmental policies assisted by behavioural modelling ». in HAYASHI Y., ROY J., *Transport, land-use and the environment*, Kluwer academic publishers, The Netherlands.
- Masson S.** (1995). Prototype de modèle stratégique de simulation des déplacements : application au cas de l'agglomération lyonnaise. PREDIT, rapport pour le compte de la DRAST, du Grand Lyon, DRE Rhône-Alpes, DDE 69, 122 p.
- Masson S.** (1997) « Interactions entre système de transport et système de localisation : de l'héritage des modèles traditionnels à l'apport des modèles interactifs de transport et d'occupation des sols », XXXIII ème Colloque de l'ASRDLF - Renouveau régional - Renouveau urbain, Lille 1-3 septembre, 31 p.
- Masson S.** (1997). « Interrelations entre système de transport et système de localisation des activités en milieu : le rôle de l'accessibilité », Colloque « Les premières journées de la proximité », Proximité et coordination économique, Lyon 5-6 mai, 16 p.
- Masson S., Péguy P.Y.** (1998), « Modèles de simulation de la croissance urbaine et du système de transport, application à la région de Lyon (France) », 8^{ème} Conférence Mondiale de la Recherche en Transport, WCTR, Anvers, 12-17 juillet 1998.
- May A.D.** (1991). « Integrated transport strategies : a new approach to urban transport policy formulation in the U.K ». *Transport Reviews*, Volume 11, N°3, pp. 223-247.
- May A.D., Roberts M., Holmes A.** (1993). « The development of integrated transport strategies for Edinburgh ». PTRC.
- Merlin P.** (1984). *La planification des transports urbains*. Masson, Paris.
- Merlin P.** (1991), *Géographie, économie et planification des transports*, PUF Fondamental, Paris, 466 p.
- Meyer M. D, Miller E.** (1984). *Urban transportation planning - A decision -oriented approach*. McGraw-Hill Series in Transportation, Consulting Editor : University of Pennsylvania.
- Mills E.** (1967), An aggregative model of resource allocation in metropolitan areas, *American Economic Reviews, Papers and Proceedings*, Vol. 57, pp. 197-210.
- Ministère de l'Équipement de l'Économie et des Finances, Direction de la prévision** (1997), *Transports urbains et calcul économique*, Paris, Ministère de l'Équipement, du Logement, des Transports et du Tourisme, Conseil général des Ponts et Chaussées ; Ministère de l'Économie et des Finances, Direction de la Prévision, Document de travail, N°97-1, 1997, 74 p.
- Modridge M., Abraham H., Maroney O .** (1993). « A strategic review of the demande implications of alternative transport policies for London ». PTRC
- Molin J.L., Vulin B.** (1992). « La distance n'est plus ce qu'elle était ». *Selected Proceedings of the Sixth World Conference on Transport Research, Volume I*, Lyon.

- Morris J.M., Dumble P.L., Wigan M.R.** (1978). Accessibility indicators for transport planning, in *Transportation Research A*, pp. 91-109.
- Muth R.** (1969), *Cities and housing*, Chicago : University of Chicago Press, 355 p.
- Neuburger H.** (1971). « User benefit in the evaluation of transport and land use plans ». *Journal of Transport Economic and Policy*, N°5, pp. 52-75.
- Olfield R.H.** (1993). A strategic transport model for the London area. Research Report 376, Transport Research Laboratory, Crowthorne, Berkshire.
- Orfeuil J-P. et al.** (1989), *Un milliard de déplacements par semaine, La mobilité des français*, La documentation française, Paris.
- Orfeuil J-P.** (1996), *Urbain et périurbain : qui va où ? Urbanisme*, n°289.
- Ortuzar J.** (1992), *Simplified transport demand modelling*, PTRC Education & Research Services Ltd, London.
- Ortuzar J., Willumsem L.G.** (1994), *Modelling transport*, John Wiley & Sons, Chichester, 433 p.
- Papageorgiou Y.Y.** (1973). The impact of the environment upon the distribution of population and land values, *Economic Geography*, 49, pp. 251-256.
- Paulley N.J., Webster F.V.** (1991). « Overview of an international study to compare models and evaluate land-use and transport policies », *Transport Reviews*, Volume 11, N°3, pp. 197-222.
- Picard P.** (1994), *Eléments de microéconomie - 1. Théorie et applications*. Montchrestien : Paris, 4^e édition, Domat Economie.
- Polese M.** (1994), *Economie urbaine et régionale, logique spatiale des mutations économiques*, Bibliothèque de Science Régionale, Economica, Paris, 376 p.
- Ponsard C.** (1988) (dir). *Analyse économique spatiale*, Collection Economie, Paris : PUF, 452 p.
- Poulit G.** (1974), *Urbanisme et transport : les critères d'accessibilité et de développement urbain*. SETRA, Ministère de l'Equipement, Paris.
- Poulit G.** (1994), *Evaluation de l'efficacité économique et environnementale des infrastructures de transport desservant les espaces de vie économique et récréative* ». in *Cercle de réflexion Infrastructure et Aménagement*, septembre 1994, 35 p. + annexes.
- Quinet E.** (1998), *Principes d'Economie des Transports*, Economica, Paris, 1998, 412 p.
- Quinet E., Hamel Z.** (1984), « Les modèles de flux de transport et la théorie économique du consommateur », *Revue d'Economie Politique*, N°3, pp. 329-346.
- Raux C.** (1983). *Modèles et prévision des comportements de mobilité quotidienne*. Thèse pour le doctorat de Docteur - Ingénieur en Economie des Transports. Université Lumière Lyon 2, Laboratoire d'Economie des Transports, Lyon.
- Raux C., Lhomet E., Masson S.** (1996), « Un modèle stratégique de simulation des déplacements urbains. Conception et aspects méthodologiques ». *Recherche, Transports, Sécurité*, N°52, Juillet-Septembre.
- Raux C., Masson S., Godinot C.** (1997). *Développement d'un modèle stratégique de*

- simulation des déplacements - 20 ans de rétrospective à travers les enquêtes-déplacements de l'agglomération lyonnaise (1976, 1986, 1995). Rapport pour le compte de la DRAST, du Grand Lyon, Conseil Général, SYTRAL. Laboratoire d'Economie des Transports, SEMALY, 181 p.
- Raux , C.** (1997) « Uncertainties in forecasting : the role of strategic modeling to control them », IATBR'97, Austin, Texas, Septembre 21-25, 27 p.
- Richardson H.W.** (1971), Urban Economics, Penguin Modern Economics Texts, Penguin Books, Ltd, England, 186 p.
- Richardson H.W.** (1977), On the possibility of positive rent gradients, Journal of Urban Economics, Vol. 4, pp. 60-68.
- Riley J.** (1973), Gammaville : an optimal town, Journal of Economic Theory, Vol. 6, pp. 471-482.
- Routhier J.L.** (1993), « Les transports urbains de longue distance. Situation et enjeux dans le bassin d'emploi de Lyon ». in Bussière Y., Bonnafous A. (eds). Transport et étalement urbain : les enjeux. Programme Rhône-Alpes, Recherches en Sciences Humaines, Les chemins de la recherche, Oullins.
- Safwat N., Magnanti T .** (1988). « A combined trip generation, trip distribution, modal split, and trip assignment model », Transportation Science, Vol. 18, N°1.
- Scheou B.** (1997). Modélisation des déplacements domicile-travail en milieu péri-urbain : le cas de la région lyonnaise. Thèse pour le doctorat ès Sciences Economiques, Université Lumière Lyon 2, Lyon.
- Ségonne C.** (1998), Comportements de choix d'itinéraires - Le cas des automobilistes marseillais confrontés au péage urbain de financement. Thèse pour le Doctorat de Sciences Economiques, option Economie des Transports, Université Lumière Lyon 2, Faculté de Sciences économiques et de gestion, Lyon.
- Sen A., Smith T.S.** (1995), Gravity models of spatial interaction behavior, Springer, Berlin, 554 p.
- Skinner A., Haynes C.** (1992), « Birmingham city centre transportation model - The concept, development and use of a multi-mode transportation model ». Traffic Engineering + Control, décembre 1992, pp. 654-660.
- Small K.A.** (1992). Urban Transportation Economics, Harwood Academic Publishers GmbH., Luxembourg, 181 p.
- Solow R.** (1972), Congestion, density and the use of land in transport, Swedish Journal of Economics, Vol. 74, n°1, pp. 161-173.
- Solow R.** (1972), **Vickrey W.** (1971), Land use in a long narrow city, Journal of Economic Theory, vol. 3, pp. 430-447.
- Strasheim M .** (1987), The theory of urban residential location, in Mills E.S., Handbook of regional and urban economics, volume 2 - Urban economics, North-Holland, Amtersdam, pp. 717-758.
- Tabourin E.** (1989). Un modèle de simulation du finacement des transports collectifs urbains à l'horizon 2000 : le modèle QUINQUIN, application à l'agglomération lyonnaise. Thèse d'Université pour le Doctorat de Sciences Economiques, Université Lumière Lyon 2, Lyon.

- Tabourin E.** (1995), « Les formes de l'étalement urbain : la logique du modèle de Bussière appliquée à l'agglomération lyonnaise », Les Annales de la Recherche Urbaine, n°67, pp. 32-42.
- Tabourin e., Andan o., Routhier j.l.** (1996) Les formes de la croissance urbaine. Le modèle de René Bussière appliqué à l'agglomération lyonnaise. Rapport de Recherche PIR VILLES.
- Varian H.R.** (1995), Analyse microéconomique, Collection Balises Ouvertures économiques, De Boeck-Wesmael : Bruxelles.
- Vermot-Desroches B.** (1994). « Interactions spatiales ». in Auray, Bailly, Derycke, Huriot (sous la dir.). Encyclopédie d'économie spatiale. ASRDLF, Economica, Paris.
- Verroen E., Jansen G .** (1993). « The scenario explorer for passenger transport, a strategic model for long term travel demand forecasting ». PTRC.
- Villeneuve P., Fréchette P .** (1998), « La répartition spatiale des retombées économiques à l'aide du modèle de Lowry », L'Espace Géographique, n°1, p. 11-22, 1998.
- Wachs M., Koenig G.** (1979). « Behavioural modelling, accessibility, mobility and travel need ». in Hensher D.A., Stopher P.R. (Eds), Behavioral travel modelling. Croom Helm, London, pp. 698-710.
- Waddell P.** (1998), « An Urban Simulation Model for Integrated Policy Analysis and Planning : residential location and housing market components of UrbanSim », Paper presented at the 8th World Conference on Transport Research, Antwerp, Belgium, July 12-17 1998.
- Webster F.V., Bly P.H., Johnston R.H., Paulley N, Dasgupta M** (1985). Evolution des déplacements urbains. Conférence Européenne des ministres des transports (CEMT), Paris.
- Webster F.V., Paulley N.J.** (1990). « An international study on land-use and transport interaction », Transport Reviews, Volume 10, N°4, Oct-Dec, pp. 287-308
- Wegener M.** (1991). « One city, three models : comparison of land-use / transport policy simulation for Dortmund », Transport Reviews, Volume 11, N°2, 1991, pp. 107-129.
- Wegener M.** (1994). « Operational Urban Models : state of the art », in Journal of the American Planning Association, Vol. 60, N°1, Winter, pp. 17-29.
- Wheaton W.** (1977), A bid rent approach to housing demand, Journal of Urban Economics, Vol. 4, pp. 200-217.
- Williams H.C.W.L., Senior M.L.** (1978). « Accessibility, spatial interaction abd the evaluation of land use transportation plans. in Karlqvist A., Lundqvist L., Snickars F., Weibull J. (Eds). Spatial Interaction Theory and Planning Models, North Holland, Amsterdam, pp. 253-287.
- Williams I., Bates J .** (1993). « APRIL, a strategic model for road pricing ». PTRC.
- Wilson A.G.** (1970). Entropy in urban and regional modelling. Pion, London, Great Britain.
- Wilson A.G.** (1998), Land-use/Transport Interaction models, Journal of Transport Economics and Policy, Volume 32, Part 1, pp. 3-26.

- Wingo L.** (1961), Transportation and urban land, Ressource for the future ? Inc. Washington D.C., 132 p.
- Wynter L.** (1995), Contributions à la théorie et à l'application de l'affectation multi-classe du trafic, Doctorat de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, spécialité Transport, ENPC, Paris.
- Younossi G.** (1991). Développement d'un modèle intégré de transport et d'urbanisme : son application à l'agglomération Bordelaise. Thèse pour le Doctorat és Sciences Economiques. Université de Bordeaux I.
- Zoller H.G.** (1988). L'espace résidentiel et le prix du logement, in Ponsard C. (dir). Analyse économique spatiale, Paris : PUF, pp. 59-92.

Annexes

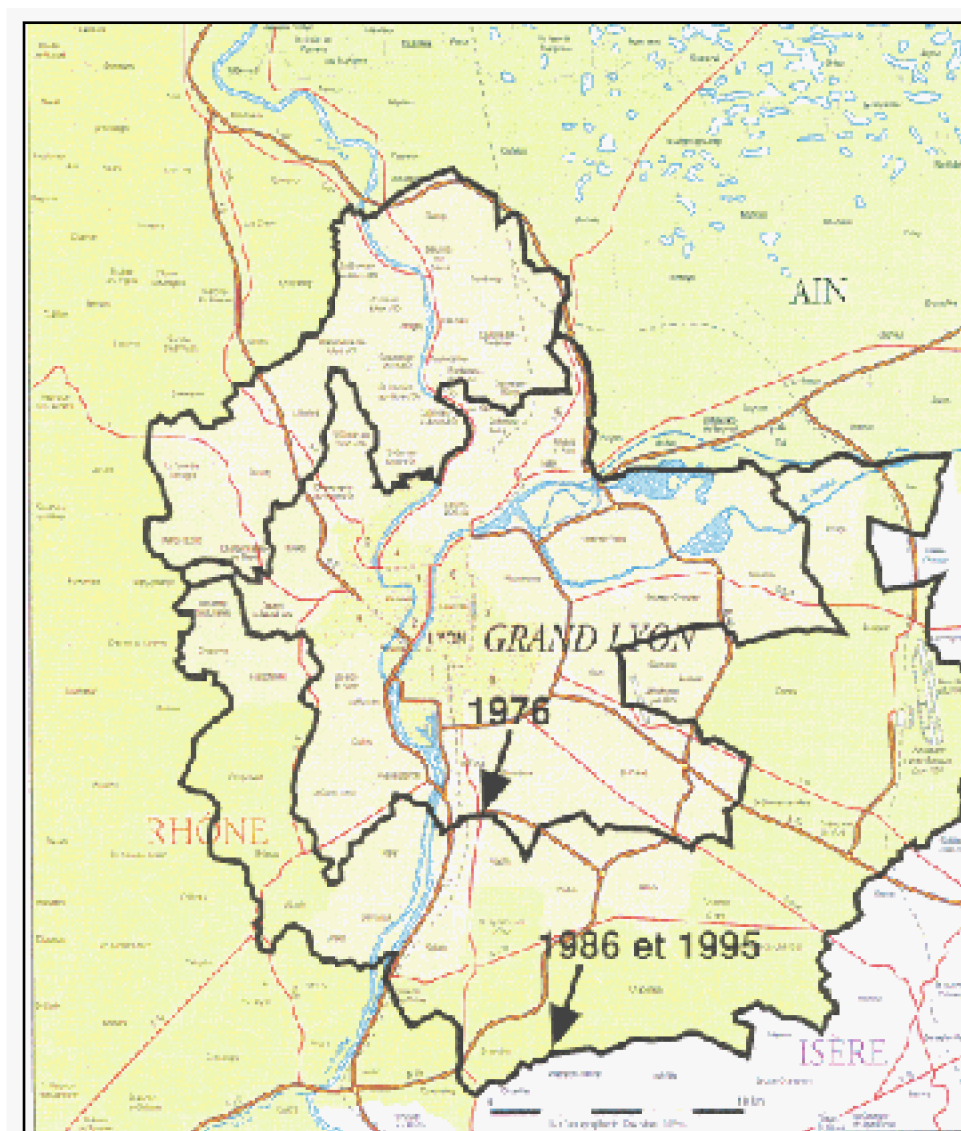
Annexe 4-1 : La logique du découpage spatial du modèle

Définir un découpage géographique pour un modèle de transport nécessite de concilier un certain nombre de contraintes : disponibilité des données, formes urbaines, typologie socio-économique, coupures physiques, consistance des réseaux, objets des tests à réaliser, etc. On s'est efforcé de rationaliser au maximum cet exercice en appliquant successivement différentes logiques.

1) Les contraintes d'enquêtes

La première contrainte géographique qui pèse sur les données enquêtées est bien sûr le périmètre d'enquête. Les enquêtes ménages de déplacements de 1986 et 1995 couvrent le « périmètre du SDAU ». L'enquête de 1976 couvrait en revanche un périmètre plus réduit (Carte n°1). Malheureusement, ce périmètre est intermédiaire entre la « première couronne » naturelle et le périmètre du SDAU. Le prendre en compte en plus des autres critères conduirait à une inflation du nombre de zones incohérentes avec la logique du modèle. On a donc décidé de s'en affranchir partiellement, quitte à renoncer à exploiter

une petite partie des résultats de 1976 dans le calage du modèle.



Carte . Périmètres d'enquêtes de l'enquête ménage de déplacements

2) Logique de couronne

La première logique géographique utilisée est celle de couronnes, qui correspond plus ou moins aux grands types d'urbanisation (Carte n°2).

La couronne « centre » correspond aux quartiers denses au coeur de Lyon, soit :

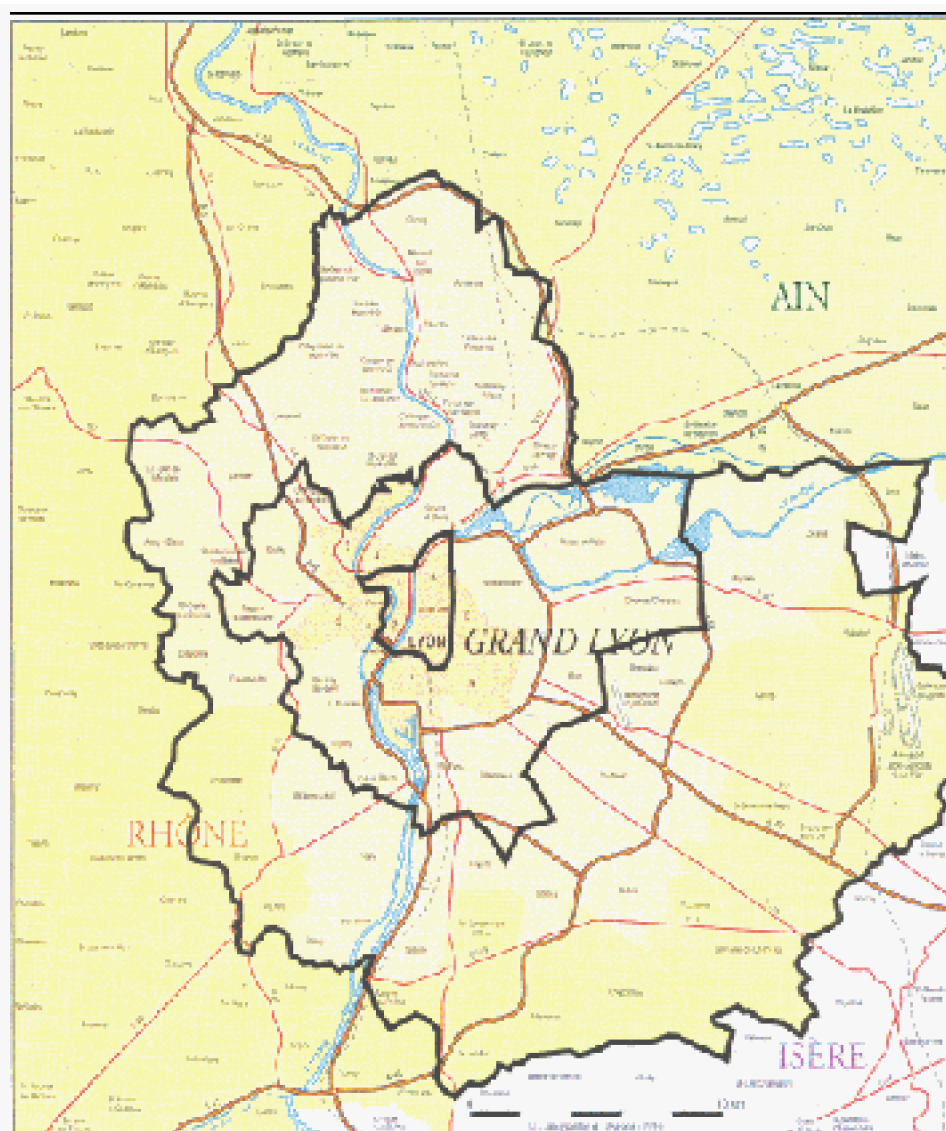
- sur la rive gauche du Rhône, le secteur délimité par les voies ferrées (parties des 3^{ème}, 6^{ème} et 7^{ème} arrondissements) ;
- sur la presqu'île, le premier arrondissement et la partie nord du 2^{ème} arrondissement ;

sur la rive droite de la Saône, le quartier du Vieux Lyon.

Cette définition a l'inconvénient de ne pas respecter les limites d'arrondissement, mais celles-ci sont trop peu conformes à la logique urbaine pour pouvoir être imposées.

« La première couronne » correspond, dans le respect des limites communales, à la zone agglomérée autour de Lyon.

La « seconde couronne » est constituée par le restant.



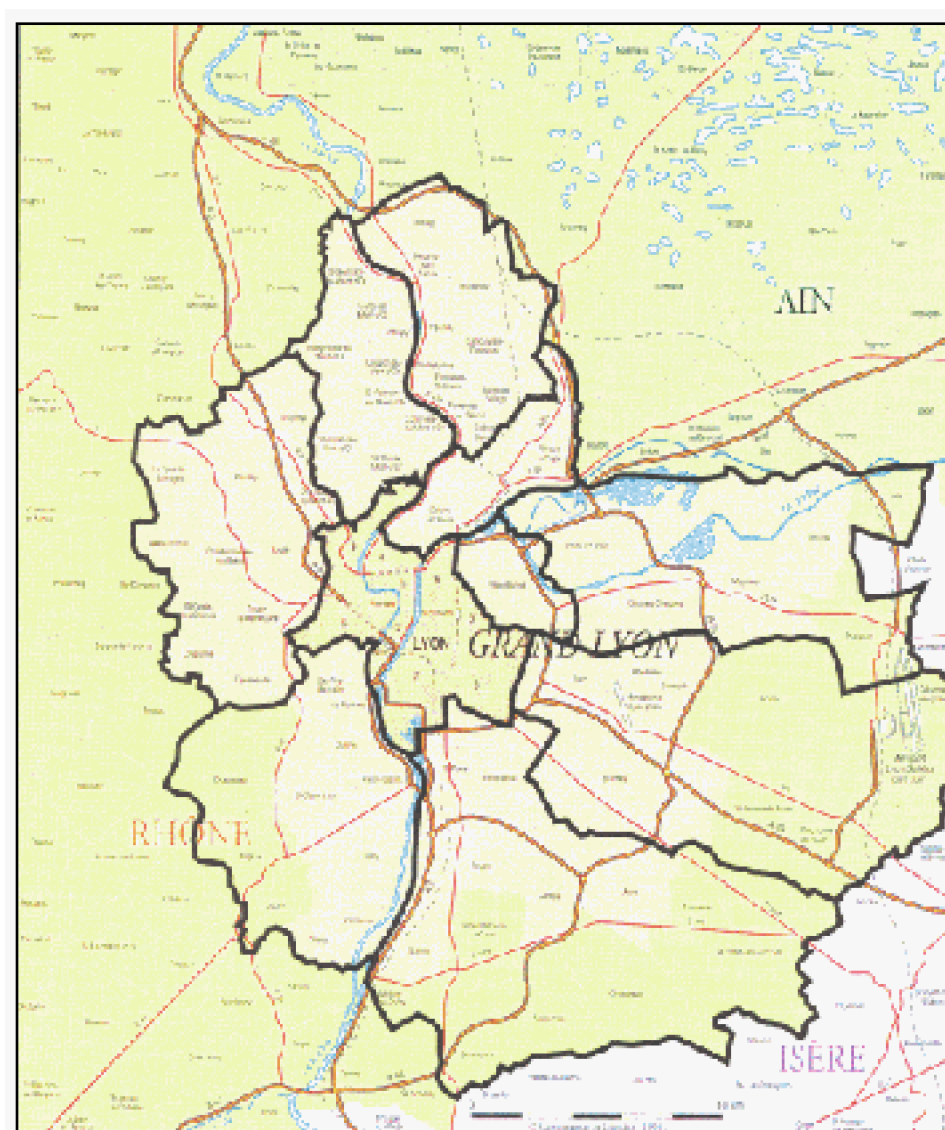
Carte . Logique de couronnes

3) Logique de bassins versants

La logique de bassins versants permet de prendre en compte à la fois la topographie des lieux, une certaine logique de fonctionnement urbain (aires d'influence des principales

communes de première couronne) et des conditions d'accès au centre de l'agglomération. En tenant compte également des contraintes d'enquêtes, on a retenu huit bassins versants autour de Lyon et Villeurbanne (Carte n°3).

- . Entre Saône et Rhône : val de Saône (rive gauche) ;
- . Caluire et Rillieux ;
- . sur la rive gauche du Rhône : bassin de Villeurbanne - canaux de Jonage et Miribel ;
- . bassin de Bron, A43, aéroport ;
- . bassin de Vénissieux - la plaine du Rhône.
- . Sur la rive droite de la Saône : bassin de Oullins - Ste Foy ;
- . bassin d'Ecully, Tassin ;
- . Mont d'Or.



Carte . Logique de bassins versants

4) Critères complémentaires

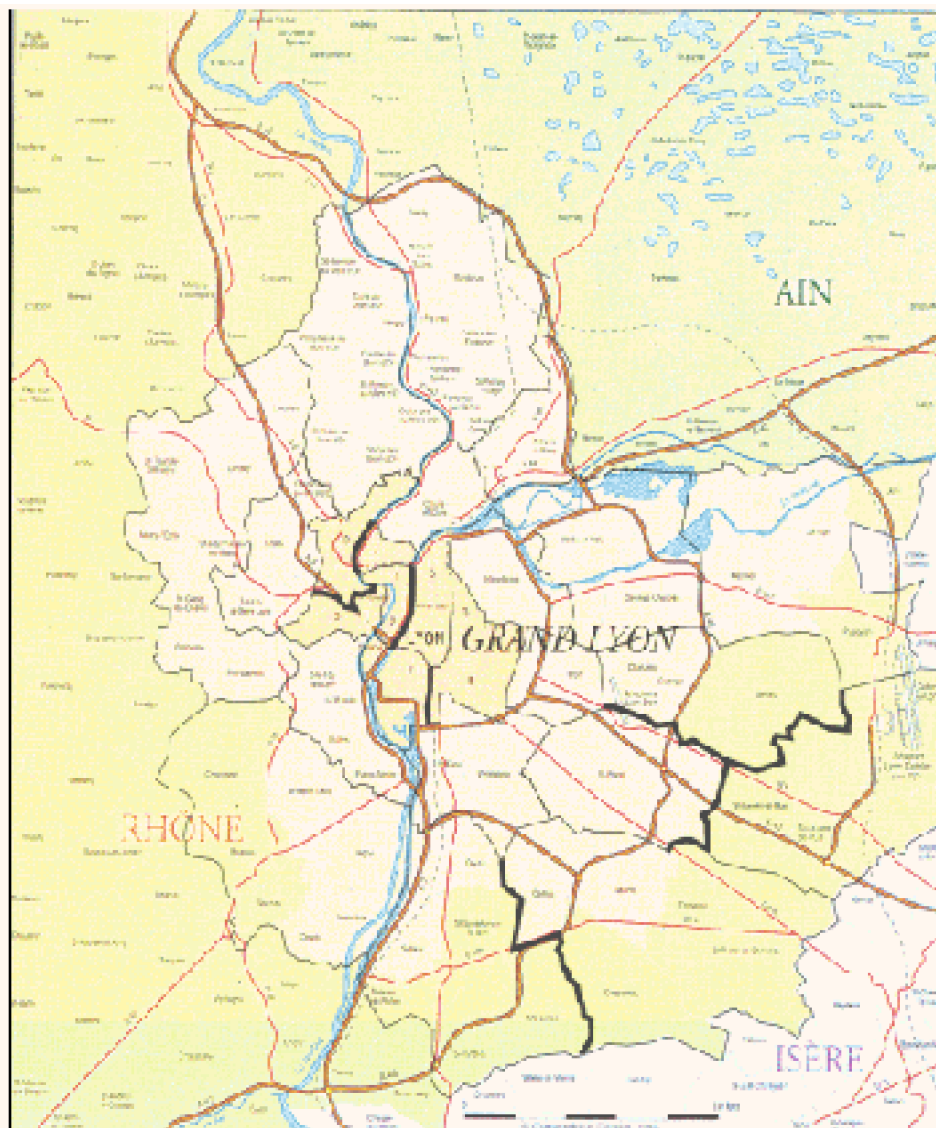
En outre des logiques précédentes, quelques séparations doivent être ajoutées (Carte n°4) :

- coupure du Rhône dans le centre ;
- coupure de la Saône entre le 4^{ème} et le 9^{ème} arrondissement ;
- logique de versant à Lyon-Ouest, calée par commodité sur la limite 5^{ème}-9^{ème} ;
-

distinction de Lyon-Est et Lyon-Sud, calée par commodité sur la limite 7^{ème}-8^{ème}.

• séparation radiale dans la zone sud, trop étendue ;

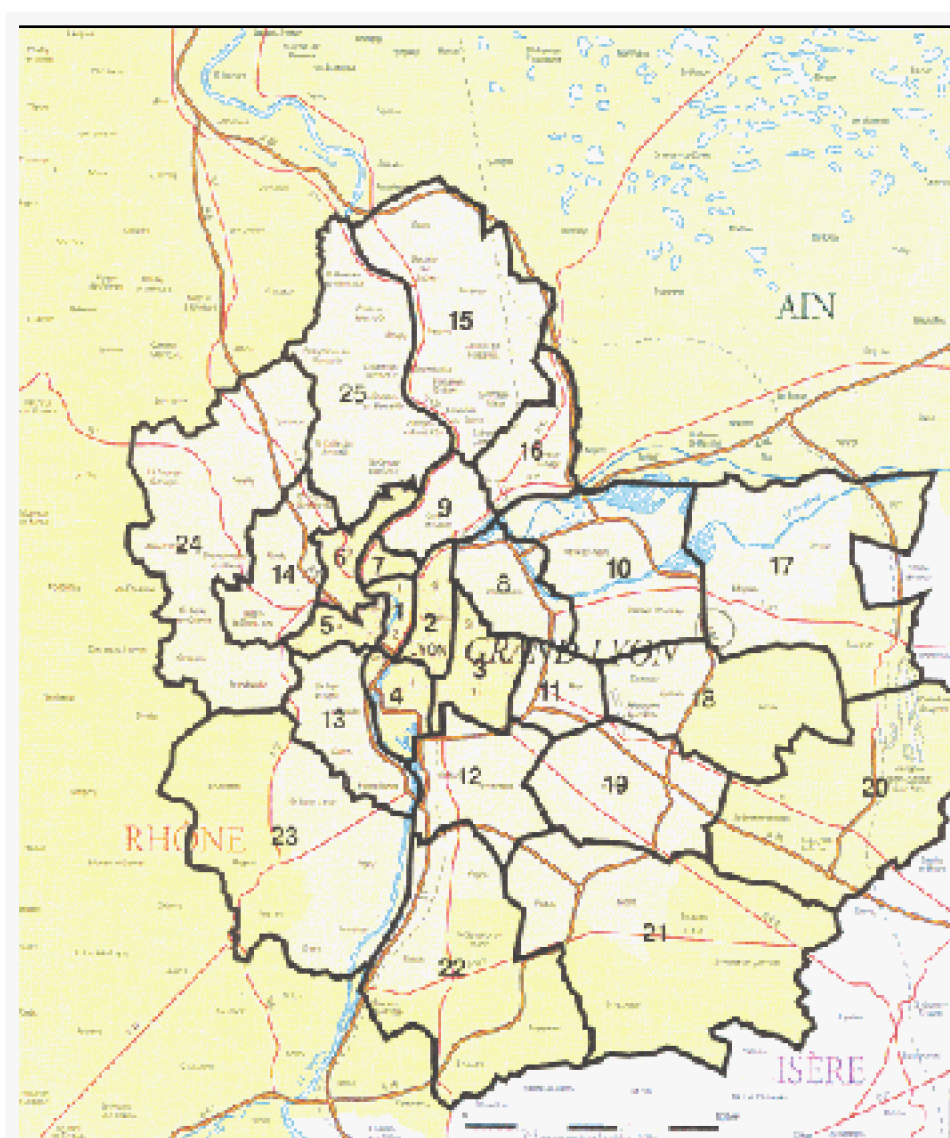
• séparation de Saint Priest et de Chassieu-Genas dans la zone est.



Carte . Critères complémentaires

5) Découpage résultant

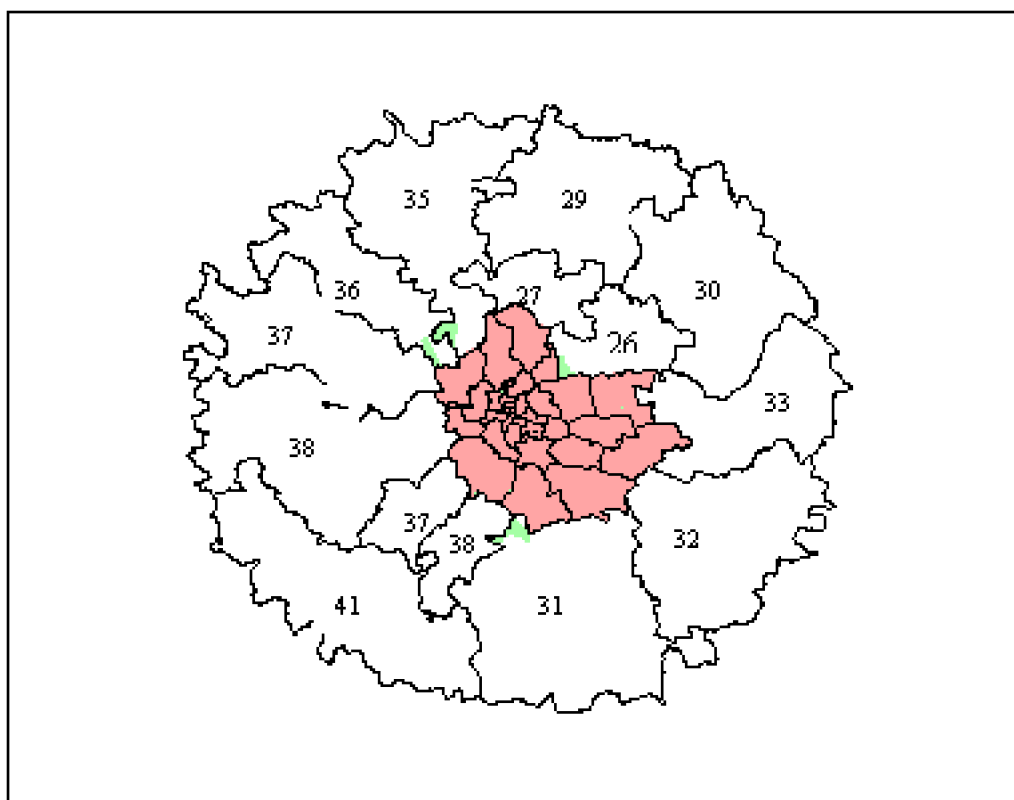
En croisant l'ensemble des critères précédents, on aboutit à un découpage en 25 zones, ce qui peut être considéré comme un niveau de découpage raisonnable pour un modèle de type stratégique (Carte n°5).



Carte . Découpage résultant sur le périmètre du SDAU

6) Découpage externe au SDAU

En ce qui concerne le découpage de l'aire extérieure au SDAU, une logique de bassins versants a été adoptée, respectant les grands corridors d'infrastructures desservant ces bassins. Le reste de l'aire d'étude a été ainsi découpé en 14 zone (Carte n°6).



Carte . Découpage sur le reste de l'aire d'étude

Tableau 1. Liste des zones du découpage du modèle

N° zone	Nom de la zone	N° zone	Nom de la zone
1	Hypercentre	21	Corbas - Mions - St Pierre de Chandieu
2	Rive gauche	22	Solaize - Feyzin - St Symphorien
3	Lyon Sud Est	23	Irigny - Vernaison - Charly
4	Lyon Sud	24	Secteur Limonest
5	Lyon Sud Ouest	25	Secteur Mont d'Or
6	Lyon Ouest	26	Secteur Miribel
7	Croix Rousse	27	Secteur Trévoux
8	Villeurbanne	28	Secteur de la Dombes
9	Caluire	29	Secteur Meximieux, Lagnieu
10	Vaulx en Velin - Décines	30	Secteur Vienne
11	Bron	31	Secteur Bourgoin
12	St Fons - Vénissieux	32	Secteur Crémieu
13	Ste Foy - La Mulatière - Pierre Bénite	33	Secteur Villefranche
14	Tassin - Ecully - Champagne	34	Secteur Vallée d'Aizergues
15	Secteur Neuville	35	Secteur Tarare
16	Rillieux	36	Secteur Vaugneray
17	Meyzieu - Jonage - Jons - Pusignan	37	Secteur Mornant
18	Chassieu - Genas	38	Secteur Givors
19	St Priest	39	Secteur Saint Etienne
20	St Bonnet - St Laurent		

Tableau 2. Liste exhaustive de la constitution des zones du découpage spatial du modèle

LES INTERACTIONS ENTRE SYSTEME DE TRANSPORT ET SYSTEME DE LOCALISATION EN MILIEU URBAIN ET LEUR MODELISATION

n° zone	Nom de la zone	code commune	nom commune
1	HYPERCENTRE	69381	LYON 1
1	HYPERCENTRE	69382	LYON 2
2	RIVE GAUCHE	69383	LYON 3
2	RIVE GAUCHE	69386	LYON 6
3	LYON SUD EST	69388	LYON 8
4	LYON SUD	69387	LYON 7
5	LYON SUD OUEST	69385	LYON 5
6	LYON OUEST	69389	LYON 9
7	CROIX ROUSSE	69384	LYON 4
8	VILLEURBANNE	69266	VILLEURBANNE
9	CALUIRE	69034	CALUIRE-ET-CUIRE
10	VAULX EN VELIN DECINES	69256	VAULX-EN-VELIN
10	VAULX EN VELIN DECINES	69275	DECINES-CHARPIEU
11	BRON	69029	BRON
12	ST FONS VENISSIEUX	69199	SAINT-FONS
12	ST FONS VENISSIEUX	69259	VENISSIEUX
13	STE FOY LA MUL PIERRE BE	69142	MULATIERE
13	STE FOY LA MUL PIERRE BE	69149	OULLINS
13	STE FOY LA MUL PIERRE BE	69152	PIERRE-BENITE
13	STE FOY LA MUL PIERRE BE	69202	SAINTE-FOY-LES-LYON
14	TASSIN ECULLY CHAMPAGNE	69040	CHAMPAGNE-AU-MONT-D'OR
14	TASSIN ECULLY CHAMPAGNE	69081	ECULLY
14	TASSIN ECULLY CHAMPAGNE	69244	TASSIN-LA-DEMI-LUNE
15	SECTEUR NEUVILLE	69033	CAILLOUX-SUR-FONTAINES
15	SECTEUR NEUVILLE	69085	FLEURIEU-SUR-SAONE
15	SECTEUR NEUVILLE	69087	FONTAINES-SAINT-MARTIN
15	SECTEUR NEUVILLE	69088	FONTAINES-SUR-SAONE
15	SECTEUR NEUVILLE	69143	NEUVILLE-SUR-SAONE
15	SECTEUR NEUVILLE	69168	ROCHETAILLÉE-SUR-SAONE
15	SECTEUR NEUVILLE	69278	GENAY
15	SECTEUR NEUVILLE	69284	MONTANAY
15	SECTEUR NEUVILLE	69292	SATHONAY-CAMP

n° zone	Nom de la zone	code commune	nom commune
15	SECTEUR NEUVILLE	69293	SATHONAY-VILLAGE
16	RILLIEUX	69286	RILLIEUX-LA-PAPE
17	MEYZIEU, JONAGE, JONS, PUS	69279	JONAGE
17	MEYZIEU, JONAGE, JONS, PUS	69280	JONS
17	MEYZIEU, JONAGE, JONS, PUS	69282	MEYZIEU
17	MEYZIEU, JONAGE, JONS, PUS	69285	PUSIGNAN
18	CHASSIEU, GENAS	69271	CHASSIEU
18	CHASSIEU, GENAS	69277	GENAS
19	St PRIEST	69290	SAINT-PRIEST
20	ST BONNET, ST LAURENT, COL	69287	SAINT-BONNET-DE-MURE
20	ST BONNET, ST LAURENT, COL	69288	SAINT-LAURENT-DE-MURE
20	ST BONNET, ST LAURENT, COL	69299	COLOMBIER-SAUGNIEU
21	CORBAS, MIONS, ST PIERRE,	69270	CHAPONNAY
21	CORBAS, MIONS, ST PIERRE,	69273	CORBAS
21	CORBAS, MIONS, ST PIERRE,	69283	MIONS
21	CORBAS, MIONS, ST PIERRE,	69289	SAINT-PIERRE-DE-CHANDIEU
21	CORBAS, MIONS, ST PIERRE,	69298	TOUSSIEU
22	SOLAIZE, FEYZIN, ST SYMPHO	69276	FEYZIN
22	SOLAIZE, FEYZIN, ST SYMPHO	69281	MARENNES
22	SOLAIZE, FEYZIN, ST SYMPHO	69291	SAINT-SYMPHORIEN-D'OZON
22	SOLAIZE, FEYZIN, ST SYMPHO	69294	SEREZIN-DU-RHONE
22	SOLAIZE, FEYZIN, ST SYMPHO	69295	SIMANDRES
22	SOLAIZE, FEYZIN, ST SYMPHO	69296	SOLAIZE
23	IRIGNY, VERNAISON, CHARLY,	69027	BRIGNAIS
23	IRIGNY, VERNAISON,	69043	CHAPONOST

LES INTERACTIONS ENTRE SYSTEME DE TRANSPORT ET SYSTEME DE LOCALISATION EN MILIEU URBAIN ET LEUR MODELISATION

n° zone	Nom de la zone	code commune	nom commune
	CHARLY,		
23	IRIGNY, VERNAISON, CHARLY,	69046	CHARLY
23	IRIGNY, VERNAISON, CHARLY,	69100	IRIGNY
23	IRIGNY, VERNAISON, CHARLY,	69204	SAINT-GENIS-LAVAL
23	IRIGNY, VERNAISON, CHARLY,	69260	VERNAISON
23	IRIGNY, VERNAISON, CHARLY,	69268	VOURLES
24	SECTEUR LIMONEST, DARDILLY	69044	CHARBONNIERES-LES-BAINS
24	SECTEUR LIMONEST, DARDILLY	69069	CRAPONNE
24	SECTEUR LIMONEST, DARDILLY	69072	DARDILLY
24	SECTEUR LIMONEST, DARDILLY	69089	FRANCHEVILLE
24	SECTEUR LIMONEST, DARDILLY	69116	LIMONEST
24	SECTEUR LIMONEST, DARDILLY	69127	MARCY-L'ETOILE
24	SECTEUR LIMONEST, DARDILLY	69205	SAINT-GENIS-LES-OLLIERES
24	SECTEUR LIMONEST, DARDILLY	69250	TOUR-DE-SALVAGNY
25	SECTEUR MONT D'OR	69003	ALBIGNY-SUR-SAONE
25	SECTEUR MONT D'OR	69063	COLLONGES-AU-MONT-D'OR
25	SECTEUR MONT D'OR	69068	COUZON-AU-MONT-D'OR
25	SECTEUR MONT D'OR	69071	CURIS-AU-MONT-D'OR
25	SECTEUR MONT	69153	POLEYMIEUX-AU-MONT-D'OR

n° zone	Nom de la zone	code commune	nom commune
	D'OR		
25	SECTEUR MONT D'OR	69191	SAINT-CYR-AU-MONT-D'OR
25	SECTEUR MONT D'OR	69194	SAINT-DIDIER-AU-MONT-D'OR
25	SECTEUR MONT D'OR	69207	SAINT-GERMAIN-AU-MONT-D'OR
25	SECTEUR MONT D'OR	69233	SAINT-ROMAIN-AU-MONT-D'OR
26	SECTEUR MIRIBEL	1027	BALAN
26	SECTEUR MIRIBEL	1032	BELIGNEUX
26	SECTEUR MIRIBEL	1043	BEYNOST
26	SECTEUR MIRIBEL	1049	BOISSE
26	SECTEUR MIRIBEL	1062	BRESSOLLES
26	SECTEUR MIRIBEL	1142	DAGNEUX
26	SECTEUR MIRIBEL	1249	MIRIBEL
26	SECTEUR MIRIBEL	1262	MONTLUEL
26	SECTEUR MIRIBEL	1275	NEYRON
26	SECTEUR MIRIBEL	1276	NIEVROZ
26	SECTEUR MIRIBEL	1297	PIZAY
26	SECTEUR MIRIBEL	1342	SAINTE-CROIX
26	SECTEUR MIRIBEL	1376	SAINT-MAURICE-DE-BEYNOST
26	SECTEUR MIRIBEL	1418	THIL
27	SECTEUR TREVoux	1105	CIVRIEUX
27	SECTEUR TREVoux	1238	MASSIEUX
27	SECTEUR TREVoux	1248	MIONNAY
27	SECTEUR TREVoux	1285	PARCIEUX
27	SECTEUR TREVoux	1318	RANCE
27	SECTEUR TREVoux	1322	REYRIEUX
27	SECTEUR TREVoux	1333	SAINT-ANDRE-DE-CORCY
27	SECTEUR TREVoux	1339	SAINT-BERNARD
27	SECTEUR TREVoux	1347	SAINT-DIDIER-DE-FORMANS
27	SECTEUR TREVoux	1362	SAINT-JEAN-DE-THURIGNEUX
27	SECTEUR TREVoux	1371	SAINT-MARCEL
27	SECTEUR TREVoux	1423	TOUSSIEUX
27	SECTEUR TREVoux	1424	TRAMOYES
27	SECTEUR TREVoux	1427	TREVoux
28	SECTEUR DES DOMBES	1001	ABERGEMENT-CLEMENCIAT
28	SECTEUR DES DOMBES	1005	AMBERIEUX-EN-DOBES
28	SECTEUR DES DOMBES	1021	ARS-SUR-FORMANS

LES INTERACTIONS ENTRE SYSTEME DE TRANSPORT ET SYSTEME DE LOCALISATION EN MILIEU URBAIN ET LEUR MODELISATION

n° zone	Nom de la zone	code commune	nom commune
28	SECTEUR DES DOMBES	1028	BANEINS
28	SECTEUR DES DOMBES	1045	BIRIEUX
28	SECTEUR DES DOMBES	1052	BOULIGNEUX
28	SECTEUR DES DOMBES	1075	CHALEINS
28	SECTEUR DES DOMBES	1083	CHANEINS
28	SECTEUR DES DOMBES	1085	CHAPELLE-DU-CHATELARD
28	SECTEUR DES DOMBES	1093	CHATILLON-SUR-CHALARONNE
28	SECTEUR DES DOMBES	1146	DOMPIERRE-SUR-CHALARONNE
28	SECTEUR DES DOMBES	1158	AMAREINS-FRANCHELEINS-CES
28	SECTEUR DES DOMBES	1207	LAPEYROUSE
28	SECTEUR DES DOMBES	1235	MARLIEUX
28	SECTEUR DES DOMBES	1250	MISERIEUX
28	SECTEUR DES DOMBES	1261	MONTHIEUX
28	SECTEUR DES DOMBES	1319	RELEVANT
28	SECTEUR DES DOMBES	1328	ROMANS
28	SECTEUR DES DOMBES	1335	SAINT-ANDRE-LE-BOUCHOUX
28	SECTEUR DES DOMBES	1356	SAINT-GEORGES-SUR-RENON
28	SECTEUR DES DOMBES	1359	SAINT-GERMAIN-SUR-RENON
28	SECTEUR DES DOMBES	1381	SAINT-NIZIER-LE-DESERT
28	SECTEUR DES DOMBES	1382	SAINTE-OLIVE
28	SECTEUR DES DOMBES	1383	SAINT-PAUL-DE-VARAX
28	SECTEUR DES DOMBES	1389	SAINT-TRIVIER-SUR-MOIGNANS

n° zone	Nom de la zone	code commune	nom commune
28	SECTEUR DES DOMBES	1393	SANDRANS
28	SECTEUR DES DOMBES	1398	SAVIGNEUX
28	SECTEUR DES DOMBES	1428	VALEINS
28	SECTEUR DES DOMBES	1443	VILLARS-LES-DOBES
28	SECTEUR DES DOMBES	1446	VILLENEUVE
29	SECTEUR MEXIMIEUX, LAGNIEU	1008	AMBUTRIX
29	SECTEUR MEXIMIEUX, LAGNIEU	1047	BLYES
29	SECTEUR MEXIMIEUX, LAGNIEU	1054	BOURG-SAINT-CHRISTOPHE
29	SECTEUR MEXIMIEUX, LAGNIEU	1074	CHALAMONT
29	SECTEUR MEXIMIEUX, LAGNIEU	1088	CHARNOZ
29	SECTEUR MEXIMIEUX, LAGNIEU	1089	CHATEAU-GAILLARD
29	SECTEUR MEXIMIEUX, LAGNIEU	1090	CHATENAY
29	SECTEUR MEXIMIEUX, LAGNIEU	1092	CHATILLON-LA-PALUD
29	SECTEUR MEXIMIEUX, LAGNIEU	1099	CHAZEY-SUR-AIN
29	SECTEUR MEXIMIEUX, LAGNIEU	1129	CRANS
29	SECTEUR MEXIMIEUX, LAGNIEU	1145	DOMPIERRE-SUR-VEYLE
29	SECTEUR	1156	FARAMANS

LES INTERACTIONS ENTRE SYSTEME DE TRANSPORT ET SYSTEME DE LOCALISATION EN MILIEU URBAIN ET LEUR MODELISATION

n° zone	Nom de la zone	code commune	nom commune
	MEXIMIEUX, LAGNIEU		
29	SECTEUR MEXIMIEUX, LAGNIEU	1198	JOYEUX
29	SECTEUR MEXIMIEUX, LAGNIEU	1202	LAGNIEU
29	SECTEUR MEXIMIEUX, LAGNIEU	1213	LEYMENT
29	SECTEUR MEXIMIEUX, LAGNIEU	1224	LOYETTES
29	SECTEUR MEXIMIEUX, LAGNIEU	1244	MEXIMIEUX
29	SECTEUR MEXIMIEUX, LAGNIEU	1260	MONTELLIER
29	SECTEUR MEXIMIEUX, LAGNIEU	1290	PEROUGES
29	SECTEUR MEXIMIEUX, LAGNIEU	1299	PLANTAY
29	SECTEUR MEXIMIEUX, LAGNIEU	1314	PRIAY
29	SECTEUR MEXIMIEUX, LAGNIEU	1325	RIGNIEUX-LE-FRANC
29	SECTEUR MEXIMIEUX, LAGNIEU	1345	SAINT-DENIS-EN-BUGEY
29	SECTEUR MEXIMIEUX, LAGNIEU	1349	SAINT-ELOI
29	SECTEUR MEXIMIEUX, LAGNIEU	1361	SAINT-JEAN-DE-NIOST
29	SECTEUR MEXIMIEUX, LAGNIEU	1366	SAINTE-JULIE

n° zone	Nom de la zone	code commune	nom commune
29	SECTEUR MEXIMIEUX, LAGNIEU	1378	SAINT-MAURICE-DE-GOURDANS
29	SECTEUR MEXIMIEUX, LAGNIEU	1379	SAINT-MAURICE-DE-REMENS
29	SECTEUR MEXIMIEUX, LAGNIEU	1386	SAINT-SORLIN-EN-BUGEY
29	SECTEUR MEXIMIEUX, LAGNIEU	1390	SAINT-VULBAS
29	SECTEUR MEXIMIEUX, LAGNIEU	1431	VAUX-EN-BUGEY
29	SECTEUR MEXIMIEUX, LAGNIEU	1434	VERSAILLEUX
29	SECTEUR MEXIMIEUX, LAGNIEU	1449	VILLETTE
29	SECTEUR MEXIMIEUX, LAGNIEU	1450	VILLIEU-LOYES-MOLLON
30	SECTEUR VIENNE	38016	ARZAY
30	SECTEUR VIENNE	38017	ASSIEU
30	SECTEUR VIENNE	38019	AUBERIVES-SUR-VAREZE
30	SECTEUR VIENNE	38037	BELLEGARDE-POUSSIEU
30	SECTEUR VIENNE	38049	BOSSIEU
30	SECTEUR VIENNE	38066	CHALONS
30	SECTEUR VIENNE	38077	CHAPELLE-DE-SURIEU
30	SECTEUR VIENNE	38087	CHASSE-SUR-RHONE
30	SECTEUR VIENNE	38101	CHEYSSIEU
30	SECTEUR VIENNE	38107	CHONAS-L'AMBALLAN
30	SECTEUR VIENNE	38110	CHUZELLES
30	SECTEUR VIENNE	38114	CLONAS-SUR-VAREZE
30	SECTEUR VIENNE	38131	COTES-D'AREY
30	SECTEUR VIENNE	38134	COUR-ET-BUIS
30	SECTEUR VIENNE	38157	ESTRABLIN
30	SECTEUR VIENNE	38160	EYZIN-PINET
30	SECTEUR VIENNE	38199	JARDIN
30	SECTEUR VIENNE	38215	LUZINAY
30	SECTEUR VIENNE	38232	MEYSSIES

LES INTERACTIONS ENTRE SYSTEME DE TRANSPORT ET SYSTEME DE LOCALISATION EN MILIEU URBAIN ET LEUR MODELISATION

n° zone	Nom de la zone	code commune	nom commune
30	SECTEUR VIENNE	38238	MOIDIEU-DETOURBE
30	SECTEUR VIENNE	38240	MOISSIEU-SUR-DOLON
30	SECTEUR VIENNE	38244	MONSTEROUX-MILIEU
30	SECTEUR VIENNE	38259	MONTSEVEROUX
30	SECTEUR VIENNE	38288	OYTIER-SAINT-OBLAS
30	SECTEUR VIENNE	38298	PEAGE-DE-ROUSSILLON
30	SECTEUR VIENNE	38307	PISIEU
30	SECTEUR VIENNE	38318	PONT-EVEQUE
30	SECTEUR VIENNE	38324	PRIMARETTE
30	SECTEUR VIENNE	38335	REVEL-TOURDAN
30	SECTEUR VIENNE	38336	REVENTIN-VAUGRIS
30	SECTEUR VIENNE	38340	ROCHES-DE-CONDRIEU
30	SECTEUR VIENNE	38344	ROUSSILLON
30	SECTEUR VIENNE	38353	SAINT-ALBAN-DU-RHONE
30	SECTEUR VIENNE	38378	SAINT-CLAIR-DU-RHONE
30	SECTEUR VIENNE	38406	SAINT-JULIEN-DE-L'HERMS
30	SECTEUR VIENNE	38408	SAINT-JUST-CHALEYSSIN
30	SECTEUR VIENNE	38425	SAINT-MAURICE-L'EXIL
30	SECTEUR VIENNE	38448	SAINT-PRIM
30	SECTEUR VIENNE	38452	SAINT-ROMAIN-DE-SURIEU
30	SECTEUR VIENNE	38459	SAINT-SORLIN-DE-VIENNE
30	SECTEUR VIENNE	38476	SAVAS-MEPIN
30	SECTEUR VIENNE	38480	SEPTEME
30	SECTEUR VIENNE	38484	SERPAIZE
30	SECTEUR VIENNE	38487	SEYSSUEL
30	SECTEUR VIENNE	38496	SONNAY
30	SECTEUR VIENNE	38519	VALENCIN
30	SECTEUR VIENNE	38536	VERNIOZ
30	SECTEUR VIENNE	38544	VIENNE
30	SECTEUR VIENNE	38556	VILLE-SOUS-ANJOU
30	SECTEUR VIENNE	38558	VILLETTE-DE-VIENNE
30	SECTEUR VIENNE	69007	AMPUIS
30	SECTEUR VIENNE	69064	CONDRIEU
30	SECTEUR VIENNE	69097	HAIES
30	SECTEUR VIENNE	69118	LOIRE-SUR-RHONE
30	SECTEUR VIENNE	69189	SAINTE-COLOMBE
30	SECTEUR VIENNE	69193	SAINT-CYR-SUR-LE-RHONE
30	SECTEUR VIENNE	69235	SAINT-ROMAIN-EN-GAL
30	SECTEUR VIENNE	69253	TUPIN-ET-SEMONS
30	SECTEUR VIENNE	69272	COMMUNAY
31	SECTEUR BOURGOIN	38015	ARTAS
31	SECTEUR	38035	BEAUVOIR-DE-MARC

n° zone	Nom de la zone	code commune	nom commune
	BOURGOIN		
31	SECTEUR BOURGOIN	38048	BONNEFAMILLE
31	SECTEUR BOURGOIN	38053	BOURGOIN-JALLIEU
31	SECTEUR BOURGOIN	38081	CHARANTONNAY
31	SECTEUR BOURGOIN	38094	CHATONNAY
31	SECTEUR BOURGOIN	38102	CHEZENEUVE
31	SECTEUR BOURGOIN	38136	CRACHIER
31	SECTEUR BOURGOIN	38141	CULIN
31	SECTEUR BOURGOIN	38144	DIEMOZ
31	SECTEUR BOURGOIN	38149	DOMARIN
31	SECTEUR BOURGOIN	38156	EPARRES
31	SECTEUR BOURGOIN	38172	FOUR
31	SECTEUR BOURGOIN	38176	FRONTONAS
31	SECTEUR BOURGOIN	38184	GRENAY
31	SECTEUR BOURGOIN	38189	HEYRIEUX
31	SECTEUR BOURGOIN	38193	ISLE-D'ABEAU
31	SECTEUR BOURGOIN	38211	LIEUDIEU
31	SECTEUR BOURGOIN	38223	MAUBEC
31	SECTEUR BOURGOIN	38230	MEYRIE
31	SECTEUR BOURGOIN	38231	MEYRIEU-LES-ETANGS
31	SECTEUR BOURGOIN	38276	NIVOLAS-VERMELLE
31	SECTEUR BOURGOIN	38339	ROCHE
31	SECTEUR	38346	ROYAS

LES INTERACTIONS ENTRE SYSTEME DE TRANSPORT ET SYSTEME DE LOCALISATION EN MILIEU URBAIN ET LEUR MODELISATION

n° zone	Nom de la zone	code commune	nom commune
	BOURGOIN		
31	SECTEUR BOURGOIN	38348	RUY
31	SECTEUR BOURGOIN	38351	SAINT-AGNIN-SUR-BION
31	SECTEUR BOURGOIN	38352	SAINT-ALBAN-DE-ROCHE
31	SECTEUR BOURGOIN	38358	SAINTE-ANNE-SUR-GERVONDE
31	SECTEUR BOURGOIN	38374	SAINT-CHEF
31	SECTEUR BOURGOIN	38389	SAINT-GEORGES-D'ESPERANCH
31	SECTEUR BOURGOIN	38392	SAINT-HILAIRE-DE-BRENS
31	SECTEUR BOURGOIN	38399	SAINT-JEAN-DE-BOURNAY
31	SECTEUR BOURGOIN	38415	SAINT-MARCEL-BEL-ACCUEIL
31	SECTEUR BOURGOIN	38449	SAINT-QUENTIN-FALLAVIER
31	SECTEUR BOURGOIN	38455	SAINT-SAVIN
31	SECTEUR BOURGOIN	38467	SALAGNON
31	SECTEUR BOURGOIN	38481	SEREZIN-DE-LA-TOUR
31	SECTEUR BOURGOIN	38512	TRAMOLE
31	SECTEUR BOURGOIN	38515	TREPT
31	SECTEUR BOURGOIN	38530	VAULX-MILIEU
31	SECTEUR BOURGOIN	38532	VENERIEU
31	SECTEUR BOURGOIN	38537	VERPILLIERE
31	SECTEUR BOURGOIN	38553	VILLEFONTAINE
31	SECTEUR BOURGOIN	38555	VILLENEUVE-DE-MARC
32	SECTEUR CREMIEU	38010	ANNOISIN-CHATELANS
32	SECTEUR CREMIEU	38011	ANTHON
32	SECTEUR CREMIEU	38026	BALME-LES-GROTTE\$

n° zone	Nom de la zone	code commune	nom commune
32	SECTEUR CREMIEU	38054	BOUVESSE-QUIRIEU
32	SECTEUR CREMIEU	38067	CHAMAGNIEU
32	SECTEUR CREMIEU	38083	CHARETTE
32	SECTEUR CREMIEU	38085	CHARVIEU-CHAVAGNEUX
32	SECTEUR CREMIEU	38097	CHAVANOZ
32	SECTEUR CREMIEU	38109	CHOZEAU
32	SECTEUR CREMIEU	38135	COURTENAY
32	SECTEUR CREMIEU	38138	CREMIEU
32	SECTEUR CREMIEU	38146	DIZIMIEU
32	SECTEUR CREMIEU	38190	HIERES-SUR-AMBY
32	SECTEUR CREMIEU	38197	JANNEYRIAS
32	SECTEUR CREMIEU	38210	LEYRIEU
32	SECTEUR CREMIEU	38247	MONTALIEU-VERCIEU
32	SECTEUR CREMIEU	38260	MORAS
32	SECTEUR CREMIEU	38282	OPTEVOZ
32	SECTEUR CREMIEU	38294	PANOSSAS
32	SECTEUR CREMIEU	38295	PARMILIEU
32	SECTEUR CREMIEU	38316	PONT-DE-CHERUY
32	SECTEUR CREMIEU	38320	PORCIEU-AMBLAGNIEU
32	SECTEUR CREMIEU	38365	SAINT-BAUDILLE-DE-LA-TOUR
32	SECTEUR CREMIEU	38451	SAINT-ROMAIN-DE-JALIONAS
32	SECTEUR CREMIEU	38475	SATOLAS-ET-BONCE
32	SECTEUR CREMIEU	38488	SICCIEU-SAINT-JULIEN-ET-CA
32	SECTEUR CREMIEU	38494	SOLEYMIEU
32	SECTEUR CREMIEU	38507	TIGNIEU-JAMEYZIEU
32	SECTEUR CREMIEU	38535	VERNAS
32	SECTEUR CREMIEU	38539	VERTRIEU
32	SECTEUR CREMIEU	38542	VEYSSILIEU
32	SECTEUR CREMIEU	38554	VILLEMOIRIEU
32	SECTEUR CREMIEU	38557	VILLETTE-D'ANTHON
33	SECTEUR VILLEFRANCHE	1030	BEAUREGARD
33	SECTEUR VILLEFRANCHE	1157	FAREINS
33	SECTEUR VILLEFRANCHE	1166	FRANS
33	SECTEUR VILLEFRANCHE	1169	GENOUILLEUX
33	SECTEUR VILLEFRANCHE	1183	GUEREINS
33	SECTEUR VILLEFRANCHE	1194	JASSANS-RIOTTIER
33	SECTEUR	1225	LURCY

LES INTERACTIONS ENTRE SYSTEME DE TRANSPORT ET SYSTEME DE LOCALISATION EN MILIEU URBAIN ET LEUR MODELISATION

n° zone	Nom de la zone	code commune	nom commune
	VILLEFRANCHE		
33	SECTEUR VILLEFRANCHE	1243	MESSIMY-SUR-SAONE
33	SECTEUR VILLEFRANCHE	1252	MOGNENEINS
33	SECTEUR VILLEFRANCHE	1258	MONTCEAUX
33	SECTEUR VILLEFRANCHE	1263	MONTMERLE-SUR-SAONE
33	SECTEUR VILLEFRANCHE	1295	PEYZIEUX-SUR-SAONE
33	SECTEUR VILLEFRANCHE	1351	SAINT-ETIENNE-SUR-CHALARON
33	SECTEUR VILLEFRANCHE	1353	SAINTE-EUPHEMIE
33	SECTEUR VILLEFRANCHE	69005	AMBERIEUX
33	SECTEUR VILLEFRANCHE	69009	ANSE
33	SECTEUR VILLEFRANCHE	69049	CHASSELAY
33	SECTEUR VILLEFRANCHE	69052	CHAZAY-D'AZERGUES
33	SECTEUR VILLEFRANCHE	69055	CHERES
33	SECTEUR VILLEFRANCHE	69114	LIERGUES
33	SECTEUR VILLEFRANCHE	69117	LISSIEU
33	SECTEUR VILLEFRANCHE	69122	LUCENAY
33	SECTEUR VILLEFRANCHE	69125	MARCILLY-D'AZERGUES
33	SECTEUR VILLEFRANCHE	69156	POMMIERS
33	SECTEUR VILLEFRANCHE	69159	POUILLY-LE-MONIAL
33	SECTEUR VILLEFRANCHE	69163	QUINCIEUX
33	SECTEUR VILLEFRANCHE	69013	ARNAS
33	SECTEUR VILLEFRANCHE	69019	BELLEVILLE
33	SECTEUR	69023	BLACE

n° zone	Nom de la zone	code commune	nom commune
	VILLEFRANCHE		
33	SECTEUR VILLEFRANCHE	69036	CERCIE
33	SECTEUR VILLEFRANCHE	69045	CHARENTAY
33	SECTEUR VILLEFRANCHE	69061	COGNYP
33	SECTEUR VILLEFRANCHE	69065	CORCELLES-EN-BEAUJOLAIS
33	SECTEUR VILLEFRANCHE	69074	DENICE
33	SECTEUR VILLEFRANCHE	69077	DRACE
33	SECTEUR VILLEFRANCHE	69092	GLEIZE
33	SECTEUR VILLEFRANCHE	69105	LACENAS
33	SECTEUR VILLEFRANCHE	69115	LIMAS
33	SECTEUR VILLEFRANCHE	69124	MARCHAMPT
33	SECTEUR VILLEFRANCHE	69137	MONTMELAS-SAINT-SORLIN
33	SECTEUR VILLEFRANCHE	69145	ODENAS
33	SECTEUR VILLEFRANCHE	69151	PERREON
33	SECTEUR VILLEFRANCHE	69162	QUINCIE-EN-BEAUJOLAIS
33	SECTEUR VILLEFRANCHE	69165	REGNIE-DURETTE
33	SECTEUR VILLEFRANCHE	69167	RIVOLET
33	SECTEUR VILLEFRANCHE	69172	SALLES-ARBUISSONNAS-EN-BEA
33	SECTEUR VILLEFRANCHE	69197	SAINT-ETIENNE-DES-OUILLIERE
33	SECTEUR VILLEFRANCHE	69198	SAINT-ETIENNE-LA-VARENNE
33	SECTEUR VILLEFRANCHE	69206	SAINT-GEORGES-DE-RENEINS
33	SECTEUR VILLEFRANCHE	69211	SAINT-JEAN-D'ARDIERES
33	SECTEUR	69215	SAINT-JULIEN

LES INTERACTIONS ENTRE SYSTEME DE TRANSPORT ET SYSTEME DE LOCALISATION EN MILIEU URBAIN ET LEUR MODELISATION

n° zone	Nom de la zone	code commune	nom commune
	VILLEFRANCHE		
33	SECTEUR VILLEFRANCHE	69218	SAINT-LAGER
33	SECTEUR VILLEFRANCHE	69242	TAPONAS
33	SECTEUR VILLEFRANCHE	69257	VAUX-EN-BEAUJOLAIS
33	SECTEUR VILLEFRANCHE	69264	VILLEFRANCHE-SUR-SAONE
34	SECTEUR VALLEE D'AZERGUES	69004	ALIX
34	SECTEUR VALLEE D'AZERGUES	69020	BELMONT
34	SECTEUR VALLEE D'AZERGUES	69047	CHARNAY
34	SECTEUR VALLEE D'AZERGUES	69050	CHATILLON
34	SECTEUR VALLEE D'AZERGUES	69056	CHESSY
34	SECTEUR VALLEE D'AZERGUES	69059	CIVRIEUX-D'AZERGUES
34	SECTEUR VALLEE D'AZERGUES	69076	DOMMARTIN
34	SECTEUR VALLEE D'AZERGUES	69106	LACHASSAGNE
34	SECTEUR VALLEE D'AZERGUES	69121	LOZANNE
34	SECTEUR VALLEE D'AZERGUES	69126	MARCY
34	SECTEUR VALLEE D'AZERGUES	69140	MORANCE
34	SECTEUR VALLEE D'AZERGUES	69212	SAINT-JEAN-DES-VIGNES
34	SECTEUR VALLEE D'AZERGUES	69017	BAGNOLS
34	SECTEUR VALLEE D'AZERGUES	69024	BOIS-D'OINGT
34	SECTEUR VALLEE D'AZERGUES	69026	BREUIL
34	SECTEUR VALLEE D'AZERGUES	69037	CHAMBOST-ALLIERES
34	SECTEUR VALLEE D'AZERGUES	69039	CHAMELET
34	SECTEUR VALLEE	69090	FRONTENAS

n° zone	Nom de la zone	code commune	nom commune
	D'AZERGUES		
34	SECTEUR VALLEE D'AZERGUES	69093	GRANDRIS
34	SECTEUR VALLEE D'AZERGUES	69101	JARNIOUX
34	SECTEUR VALLEE D'AZERGUES	69107	LAMURE-SUR-AZERGUES
34	SECTEUR VALLEE D'AZERGUES	69111	LEGNY
34	SECTEUR VALLEE D'AZERGUES	69113	LETRA
34	SECTEUR VALLEE D'AZERGUES	69130	MEAUX-LA-MONTAGNE
34	SECTEUR VALLEE D'AZERGUES	69134	MOIRE
34	SECTEUR VALLEE D'AZERGUES	69146	OINGT
34	SECTEUR VALLEE D'AZERGUES	69169	RONNO
34	SECTEUR VALLEE D'AZERGUES	69192	SAINT-CYR-LE-CHATOUX
34	SECTEUR VALLEE D'AZERGUES	69217	SAINT-JUST-D'AVRAY
34	SECTEUR VALLEE D'AZERGUES	69222	SAINT-LAURENT-D'OINGT
34	SECTEUR VALLEE D'AZERGUES	69230	SAINTE-PAULE
34	SECTEUR VALLEE D'AZERGUES	69239	SAINT-VERAND
34	SECTEUR VALLEE D'AZERGUES	69245	TERNAND
34	SECTEUR VALLEE D'AZERGUES	69246	THEIZE
34	SECTEUR VALLEE D'AZERGUES	69265	VILLE-SUR-JARNIOUX
35	SECTEUR TARARE	69010	ARBRESLE
35	SECTEUR TARARE	69086	FLEURIEUX-SUR-L'ARBRESLE
35	SECTEUR TARARE	69112	LENTILLY
35	SECTEUR TARARE	69144	NUELLES
35	SECTEUR TARARE	69208	SAINT-GERMAIN-SUR-L'ARBRES
35	SECTEUR TARARE	42029	BUSSIERES
35	SECTEUR TARARE	42063	CHIRASSIMONT
35	SECTEUR TARARE	42098	FOURNEAUX
35	SECTEUR TARARE	42128	MACHEZAL

LES INTERACTIONS ENTRE SYSTEME DE TRANSPORT ET SYSTEME DE LOCALISATION EN MILIEU URBAIN ET LEUR MODELISATION

n° zone	Nom de la zone	code commune	nom commune
35	SECTEUR TARARE	42148	MONTCHAL
35	SECTEUR TARARE	42196	SAINTE-AGATHE-EN-DONZY
35	SECTEUR TARARE	42213	SAINT-CYR-DE-VALORGES
35	SECTEUR TARARE	42334	VIOLAY
35	SECTEUR TARARE	69001	AFFOUX
35	SECTEUR TARARE	69008	ANCY
35	SECTEUR TARARE	69021	BESSENAY
35	SECTEUR TARARE	69022	BIBOST
35	SECTEUR TARARE	69032	BULLY
35	SECTEUR TARARE	69057	CHEVINAY
35	SECTEUR TARARE	69073	DAREIZE
35	SECTEUR TARARE	69075	DIEME
35	SECTEUR TARARE	69083	EVEUX
35	SECTEUR TARARE	69102	JOUX
35	SECTEUR TARARE	69147	OLMES
35	SECTEUR TARARE	69157	PONTCHARRA-SUR-TURDINE
35	SECTEUR TARARE	69171	SAIN-BEL
35	SECTEUR TARARE	69173	SARCEY
35	SECTEUR TARARE	69174	SAUVAGES
35	SECTEUR TARARE	69175	SAVIGNY
35	SECTEUR TARARE	69177	SOURCIEUX-LES-MINES
35	SECTEUR TARARE	69181	SAINT-APPOLINAIRE
35	SECTEUR TARARE	69188	SAINT-CLEMENT-SUR-VALSONNE
35	SECTEUR TARARE	69200	SAINT-FORGEUX
35	SECTEUR TARARE	69216	SAINT-JULIEN-SUR-BIBOST
35	SECTEUR TARARE	69223	SAINT-LOUP
35	SECTEUR TARARE	69225	SAINT-MARCEL-L'ECLAIRE
35	SECTEUR TARARE	69231	SAINT-PIERRE-LA-PALUD
35	SECTEUR TARARE	69234	SAINT-ROMAIN-DE-POPEY
35	SECTEUR TARARE	69243	TARARE
35	SECTEUR TARARE	69254	VALSONNE
36	SECTEUR VAUGNERAY	42073	COTTANCE
36	SECTEUR VAUGNERAY	42090	ESSERTINES-EN-DONZY
36	SECTEUR VAUGNERAY	42113	JAS
36	SECTEUR VAUGNERAY	42165	PANISSIERES
36	SECTEUR VAUGNERAY	42193	ROZIER-EN-DONZY
36	SECTEUR VAUGNERAY	42202	SAINT-BARTHELEMY-LESTRA

n° zone	Nom de la zone	code commune	nom commune
36	SECTEUR VAUGNERAY	42214	SAINT-CYR-LES-VIGNES
36	SECTEUR VAUGNERAY	42261	SAINT-MARTIN-LESTRA
36	SECTEUR VAUGNERAY	42296	SALT-EN-DONZY
36	SECTEUR VAUGNERAY	42297	SALVIZINET
36	SECTEUR VAUGNERAY	42319	VALEILLE
36	SECTEUR VAUGNERAY	69014	AVEIZE
36	SECTEUR VAUGNERAY	69028	BRINDAS
36	SECTEUR VAUGNERAY	69030	BRULLIOLES
36	SECTEUR VAUGNERAY	69031	BRUSSIEU
36	SECTEUR VAUGNERAY	69038	CHAMBOST-LONGESSAIGNE
36	SECTEUR VAUGNERAY	69042	CHAPELLE-SUR-COISE
36	SECTEUR VAUGNERAY	69062	COISE
36	SECTEUR VAUGNERAY	69067	COURZIEU
36	SECTEUR VAUGNERAY	69078	DUERNE
36	SECTEUR VAUGNERAY	69094	GREZIEU-LA-VARENNE
36	SECTEUR VAUGNERAY	69095	GREZIEU-LE-MARCHE
36	SECTEUR VAUGNERAY	69098	HALLES
36	SECTEUR VAUGNERAY	69099	HAUTE-RIVOIRE
36	SECTEUR VAUGNERAY	69110	LARAJASSE
36	SECTEUR VAUGNERAY	69120	LONGESSAIGNE
36	SECTEUR VAUGNERAY	69131	MESSIMY
36	SECTEUR VAUGNERAY	69132	MEYS

LES INTERACTIONS ENTRE SYSTEME DE TRANSPORT ET SYSTEME DE LOCALISATION EN MILIEU URBAIN ET LEUR MODELISATION

n° zone	Nom de la zone	code commune	nom commune
36	SECTEUR VAUGNERAY	69138	MONTROMANT
36	SECTEUR VAUGNERAY	69139	MONTROTTIER
36	SECTEUR VAUGNERAY	69154	POLLIONNAY
36	SECTEUR VAUGNERAY	69155	POMEYS
36	SECTEUR VAUGNERAY	69178	SOUZY
36	SECTEUR VAUGNERAY	69187	SAINT-CLEMENT-LES-PLACES
36	SECTEUR VAUGNERAY	69190	SAINTE-CONSORCE
36	SECTEUR VAUGNERAY	69201	SAINTE-FOY-L'ARGENTIERE
36	SECTEUR VAUGNERAY	69203	SAINT-GENIS-L'ARGENTIERE
36	SECTEUR VAUGNERAY	69220	SAINT-LAURENT-DE-CHAMOISS
36	SECTEUR VAUGNERAY	69221	SAINT-LAURENT-DE-VAUX
36	SECTEUR VAUGNERAY	69227	SAINT-MARTIN-EN-HAUT
36	SECTEUR VAUGNERAY	69238	SAINT-SYMPHORIEN-SUR-COISE
36	SECTEUR VAUGNERAY	69249	THURINS
36	SECTEUR VAUGNERAY	69255	VAUGNERAY
36	SECTEUR VAUGNERAY	69263	VILLECHENEVE
36	SECTEUR VAUGNERAY	69269	YZERON
37	SECTEUR MORNANT	69051	CHAUSSAN
37	SECTEUR MORNANT	69141	MORNANT
37	SECTEUR MORNANT	69148	ORLIENAS
37	SECTEUR MORNANT	69166	RIVERIE
37	SECTEUR MORNANT	69170	RONTALON
37	SECTEUR MORNANT	69176	SOUCIEU-EN-JARREST
37	SECTEUR MORNANT	69180	SAINT-ANDRE-LA-COTE
37	SECTEUR MORNANT	69184	SAINTE-CATHERINE
37	SECTEUR MORNANT	69195	SAINT-DIDIER-SOUS-RIVERIE
37	SECTEUR MORNANT	69219	SAINT-LAURENT-D'AGNY

n° zone	Nom de la zone	code commune	nom commune
37	SECTEUR MORNANT	69228	SAINT-MAURICE-SUR-DARGOIRE
37	SECTEUR MORNANT	69237	SAINT-SORLIN
37	SECTEUR MORNANT	69241	TALUYERS
38	SECTEUR GIVORS	69048	CHASSAGNY
38	SECTEUR GIVORS	69080	ECHALAS
38	SECTEUR GIVORS	69091	GIVORS
38	SECTEUR GIVORS	69096	GRIGNY
38	SECTEUR GIVORS	69119	LONGES
38	SECTEUR GIVORS	69133	MILLERY
38	SECTEUR GIVORS	69136	MONTAGNY
38	SECTEUR GIVORS	69179	SAINT-ANDEOL-LE-CHATEAU
38	SECTEUR GIVORS	69213	SAINT-JEAN-DE-TOULAS
38	SECTEUR GIVORS	69236	SAINT-ROMAIN-EN-GIER
38	SECTEUR GIVORS	69252	TREVES
38	SECTEUR GIVORS	69297	TERNAY
39	SECTEUR SAINT ETIENNE	42010	AVEIZIEUX
39	SECTEUR SAINT ETIENNE	42013	BELLEGARDE-EN-FOREZ
39	SECTEUR SAINT ETIENNE	42018	BESSEY
39	SECTEUR SAINT ETIENNE	42032	CELLIEU
39	SECTEUR SAINT ETIENNE	42036	CHAGNON
39	SECTEUR SAINT ETIENNE	42043	CHAMBOEUF
39	SECTEUR SAINT ETIENNE	42051	CHAPELLE-VILLARS
39	SECTEUR SAINT ETIENNE	42053	CHATEAUNEUF
39	SECTEUR SAINT ETIENNE	42055	CHATELUS
39	SECTEUR SAINT ETIENNE	42056	CHAVANAY
39	SECTEUR SAINT ETIENNE	42059	CHAZELLES-SUR-LYON
39	SECTEUR SAINT ETIENNE	42062	CHEVRIERES
39	SECTEUR SAINT ETIENNE	42064	CHUYER
39	SECTEUR SAINT ETIENNE	42083	DARGOIRE

LES INTERACTIONS ENTRE SYSTEME DE TRANSPORT ET SYSTEME DE LOCALISATION EN MILIEU URBAIN ET LEUR MODELISATION

n° zone	Nom de la zone	code commune	nom commune
39	SECTEUR SAINT ETIENNE	42085	DOIZIEUX
39	SECTEUR SAINT ETIENNE	42093	FARNAY
39	SECTEUR SAINT ETIENNE	42096	FONTANES
39	SECTEUR SAINT ETIENNE	42100	GIMOND
39	SECTEUR SAINT ETIENNE	42102	GRAMMOND
39	SECTEUR SAINT ETIENNE	42103	GRAND-CROIX
39	SECTEUR SAINT ETIENNE	42110	HORME
39	SECTEUR SAINT ETIENNE	42123	LORETTE
39	SECTEUR SAINT ETIENNE	42124	LUPE
39	SECTEUR SAINT ETIENNE	42132	MALLEVAL
39	SECTEUR SAINT ETIENNE	42133	MARCENOD
39	SECTEUR SAINT ETIENNE	42138	MARINGES
39	SECTEUR SAINT ETIENNE	42167	PAVEZIN
39	SECTEUR SAINT ETIENNE	42168	PELUSSIN
39	SECTEUR SAINT ETIENNE	42186	RIVE-DE-GIER
39	SECTEUR SAINT ETIENNE	42191	ROISEY
39	SECTEUR SAINT ETIENNE	42207	SAINT-CHAMOND
39	SECTEUR SAINT ETIENNE	42208	SAINT-CHRISTO-EN-JAREZ
39	SECTEUR SAINT ETIENNE	42210	SAINTE-CROIX-EN-JAREZ
39	SECTEUR SAINT ETIENNE	42216	SAINT-DENIS-SUR-COISE
39	SECTEUR SAINT ETIENNE	42222	SAINT-GALMIER
39	SECTEUR SAINT ETIENNE	42225	GENILAC

n° zone	Nom de la zone	code commune	nom commune
39	SECTEUR SAINT ETIENNE	42234	SAINT-HEAND
39	SECTEUR SAINT ETIENNE	42242	SAINT-JOSEPH
39	SECTEUR SAINT ETIENNE	42259	SAINT-MARTIN-LA-PLAINE
39	SECTEUR SAINT ETIENNE	42264	SAINT-MEDARD-EN-FOREZ
39	SECTEUR SAINT ETIENNE	42265	SAINT-MICHEL-SUR-RHONE
39	SECTEUR SAINT ETIENNE	42271	SAINT-PAUL-EN-JAREZ
39	SECTEUR SAINT ETIENNE	42272	SAINT-PIERRE-DE-BOEUF
39	SECTEUR SAINT ETIENNE	42283	SAINT-ROMAIN-EN-JAREZ
39	SECTEUR SAINT ETIENNE	42302	SORBIERS
39	SECTEUR SAINT ETIENNE	42305	TALAUDIERE
39	SECTEUR SAINT ETIENNE	42307	TARTARAS
39	SECTEUR SAINT ETIENNE	42308	TERRASSE-SUR-DORLAY
39	SECTEUR SAINT ETIENNE	42320	VALFLEURY
39	SECTEUR SAINT ETIENNE	42327	VERIN
39	SECTEUR SAINT ETIENNE	42335	VIRICELLES
39	SECTEUR SAINT ETIENNE	42336	VIRIGNEUX

Annexe 4-2 : « L' enquête ménage » de déplacements : méthodologie et précision statistique

Tous les 10 ans, une enquête fournit une vue d'ensemble des comportements de déplacements des ménages résidant dans l'agglomération lyonnaise. La méthodologie d'enquête est conduite par l'INSEE. L'enquête est administrée en face à face au domicile du ménage enquêté. Toutes les personnes du ménage ayant plus de 5 ans sont

interrogées sur les déplacements qu'ils ont effectués la veille. Cette enquête fournit trois niveaux de renseignements : sur le ménage enquêté, sur les personnes qui se déplacent, sur les déplacements eux-mêmes.

1. Le tirage de l'échantillon

Nous rappelons que l'échantillon des enquêtes-ménages est construit selon la méthode des sondages aléatoires représentatifs à probabilité inégale. L'ensemble du périmètre est découpé en secteurs géographiques. Dans chaque secteur, on procède à un tirage aléatoire simple et le pas de sondage est défini en fonction du nombre d'enquêtes à réaliser et du nombre de logements recensés dans la zone lors du dernier recensement. Selon les enquêtes, cette base des logements a pu être corrigée pour tenir compte des logements neufs apparus au moment de l'enquête ainsi que des logements détruits. L'unité de base statistique est le logement, donc le ménage qui y réside, c'est-à-dire tous les occupants réguliers du logement, qu'il y ait ou non des liens matrimoniaux ou familiaux. Ensuite, le tirage est effectué selon plusieurs degrés successifs, les personnes puis leurs déplacements.

11. L'échantillon de premier degré - unité statistique : un ménage

Mode de tirage	Les ménages sont tirés par sondage aléatoire stratifié à partir de la base de sondage. Le critère de stratification est la localisation géographique.
Taux de sondage	A chaque zone correspond un taux de sondage différent qui permet de disposer d'une population représentative, au niveau de ces zones dans un premier temps, puis au niveau de l'agglomération ensuite. Globalement, le taux de sondage est d'environ 1%.

12. L'échantillon de deuxième degré - unité statistique : une personne du ménage de plus de 5 ans

Mode de tirage	Dans chaque ménage de l'échantillon, on enquête toutes les personnes du ménage de plus de 5 ans. Il s'agit donc d'un tirage en grappe pas tout à fait exhaustif. Lors du traitement de l'enquête et de calculs d'indicateurs portant sur les personnes, l'effet grappe devra donc être estimé et intégré aux calculs de précision.
Mode de tirage	Dans chaque ménage de l'échantillon, on enquête toutes les personnes du ménage de plus de 5 ans. Il s'agit donc d'un tirage en grappe pas tout à fait exhaustif. Lors du traitement de l'enquête et de calculs d'indicateurs portant sur les personnes, l'effet grappe devra donc être estimé et intégré aux calculs de précision.

13. L'échantillon de troisième degré - unité statistique : les déplacements des personnes du ménage

Mode de tirage	On recense tous les déplacements effectués la veille de l'enquête des personnes interrogées. Il s'agit donc d'un tirage en grappe exhaustif.
Mode de tirage	On recense tous les déplacements effectués la veille de l'enquête des personnes interrogées. Il s'agit donc d'un tirage en grappe exhaustif.

2. L'effet de stratification et l'effet de grappe

Pour résumer, les enquêtes-ménages ont un mode de sondage des ménages enquêtés stratifié par zone géographique, et sur chaque ménage on opère un sondage en grappe des personnes de plus de 5 ans, et un sondage en grappe des déplacements. Ce mode de sondage est donc susceptible d'avoir des effets sur la précision des évaluations. Deux effets peuvent être mis en évidence :

- l'effet de stratification,
- l'effet de grappe.

21. L'effet de stratification

La technique de stratification a pour objectif principal d'améliorer à moindre coût la représentativité de l'échantillon par rapport à la population d'où il est extrait, et ainsi, d'augmenter la précision des estimations.

Il y a plusieurs façons d'effectuer un tirage stratifié en fonction des objectifs que l'on vise :

- si on recherche une plus grande précision sur les résultats donnés au niveau de l'agglomération, on aura intérêt à adopter une répartition optimale ;

- si, de plus, on veut pouvoir dépouiller plus facilement l'enquête, on adoptera une répartition proportionnelle (c'est-à-dire que le taux de sondage est le même quelque soit la strate) ;

- si on veut que les résultats donnés au niveau des zones aient la même précision, on s'éloignera des cas précédents, et on enquêtera le même nombre de ménages dans chaque zone.

C'est en pratique la dernière solution qui est adoptée dans les enquêtes-ménages.

Dans tous les cas, le tirage stratifié à allocation proportionnelle est plus précis que le sondage aléatoire simple. Mais ici nous avons un sondage où la taille de chaque strate tend à être égale. Cette stratification fournit des indicateurs dont la précision est plus faible que la stratification à allocation proportionnelle. Nous avons calculé la perte de précision qui résulte de la méthode de stratification adoptée par les enquêtes-ménages⁴⁷.

Dans le tableau ci-dessous, nous présentons la perte de précision induite par la stratification⁴⁸ :

Tableau 3. Perte de précision induite par la stratification

⁴⁷ Cette analyse est inspirée du rapport *Eléments pour évaluer la précision obtenue dans l'estimation des indicateurs sonnés par les enquêtes ménages*. CERTU : Lyon. 1977.

⁴⁸ La perte de précision relative peut être calculée en faisant le rapport entre l'écart-type de l'estimateur de la moyenne calculé sur un sondage stratifié à taille de strate constante et l'écart-type de l'estimateur de la moyenne calculé sur un sondage stratifié à allocation proportionnelle. La variance de l'estimateur de la moyenne calculé sur sondage stratifié est : avec l'écart-type de la strate h , l'effectif enquêté de la strate h , l'effectif total de la strate h . Dans le cas d'un sondage stratifié à allocation proportionnelle, on considère que .

	nb de personnes par ménage			nb de déplacements par ménage		
	EM76	EM 85	EM 95	EM76	EM 85	EM 95
moyenne non pondérée	2,69	2,44	2,33	9,47	8,53	8,89
moyenne pondérée	2,77	2,36	2,23	9,54	8,21	8,7
écart-type sur l'estimation de M sur un échantillon stratifié proportionnel (1)	0,0228	0,0178	0,0156	0,1079	0,0888	0,0841
écart-type sur l'estimation de M sur un échantillon stratifié enquête-ménage (2)	0,026	0,0202	0,0178	0,1221	0,1024	0,096
rapport de (2) sur (1)	1,14	1,13	1,14	1,13	1,15	1,14
perte de précision	14%	13%	14%	13%	15%	14%

La perte de précision est inférieure à 15% en valeur relative. Ce résultat montre que la méthode de tirage adoptée (effectifs à peu près constants dans chaque strate) n'influe pas de manière très sensible sur la précision des indicateurs évalués au niveau de l'agglomération.

22. L'effet grappe

Le principe de la méthode du sondage en grappe est le suivant : les individus enquêtés sont tirés directement à partir des ménages sélectionnés par strate ; les grappes sont ici les ménages. De même, les déplacements enquêtés sont tous ceux effectués par les personnes interrogées.

L'inconvénient de cette méthode est le suivant : les individus appartenant à une même grappe ont tendance à se ressembler et la diversification des situations risque de provenir davantage de la diversité des grappes que des individus. La précision des résultats dépend davantage du nombre de grappes prélevées que du nombre des individus qui les composent.

L'influence du tirage en grappe sur la prévision des indicateurs peut être mesuré par le coefficient de grappe, qui calcule le rapport entre l'écart-type de l'estimateur calculé selon le mode de sondage en grappe et l'écart-type de l'estimateur calculé comme s'il s'agissait d'un sondage aléatoire simple.

Il faut distinguer ici deux effets de grappe distincts selon la variable considérée :

- pour les valeurs évaluées à partir d'un échantillon de personnes ; c'est le cas de toutes les variables de mobilité ;

- pour les valeurs évaluées à partir d'un échantillon de déplacements ; c'est le cas des parts modales, et des durées de déplacements.

Voici quelques exemples de coefficients de grappe sur la variable mobilité (effet grappe sur les personnes).

Tableau 4. Coefficients de grappe sur la variable mobilité

	nb de déplacements tous modes par personne			nb de déplacements VP par personne		
	EM76	EM 85	EM 95	EM76	EM 85	EM 95
moyenne simple	3,82	3,49	3,81	1,45	1,76	2,16
écart-type de l'estimateur de la moyenne calculé selon un échantillon aléatoire	0,0259	0,0224	0,0216	0,0226	0,0219	0,0218
moyenne en grappe	3,82	3,49	3,81	1,45	1,76	2,16
écart-type de l'estimateur de la moyenne calculé selon un sondage en grappe	0,0304	0,0272	0,0255	0,0276	0,0277	0,0272
coefficient de grappe	1,1701	1,2127	1,1777	1,2202	1,2691	1,2489

A la vue de ce tableau, nous pouvons conclure que l'effet grappe sur les variables de mobilité est peu important. De façon générale, on peut considérer que l'effet grappe sur les personnes est négligeable.

De la même façon, nous avons calculé les effets grappe sur des variables liés aux déplacements, et en particulier, les effets grappe sur les durées de déplacements.

Tableau 5. Coefficients de grappe sur la variable « durée des déplacements tous modes »

	EM 76	EM 85	EM 95
Moyenne	16,3	15,9	16,6
écart-type de l'estimateur de la moyenne calculé selon un échantillon simple	0,08	0,07	0,06
écart-type de l'estimateur de la moyenne calculé selon un sondage en grappe	0,12	0,11	0,10
coefficient de grappe	1,52	1,50	1,47

Tableau 6. Coefficients de grappe sur la variable « durée de déplacements en voiture particulière »

	EM 76	EM 85	EM 95
Moyenne	15,9	14,7	15,5
écart-type de l'estimateur de la moyenne calculé selon un échantillon simple	0,10	0,07	0,07
écart-type de l'estimateur de la moyenne calculé selon un sondage en grappe	0,15	0,11	0,10
coefficient de grappe	1,45	1,51	1,46

Tableau 7. Coefficients de grappe sur la variable « durée des déplacements en transports collectifs »

	EM 76	EM 85	EM 95
Moyenne	31,9	37,3	32,4
écart-type de l'estimateur de la moyenne calculé selon un échantillon simple	0,31	0,26	0,24
écart-type de l'estimateur de la moyenne calculé selon un sondage en grappe	0,41	0,35	0,32
coefficient de grappe	1,33	1,38	1,32

Les effets de grappe sur les durées de déplacements ne sont pas négligeables. En conséquent, on doit corriger les erreurs relatives sur ce type de variable, erreurs qui doivent être multipliées par le coefficient de grappe.

Annexe 4-3 : La construction d'un indicateur synthétique des valeurs immobilières

L'observation des prix immobiliers sur la région lyonnaise se fonde sur les données recueillies par l'Observatoire des Transactions Immobilières et Foncières (OTIF) de la Communauté urbaine de Lyon. L'OTIF procède, à partir de données collectées dans les extraits d'actes notariés, fournis par les services fiscaux, à une analyse du marché foncier et immobilier. Nous disposons, grâce aux données fournies par l'OTIF, du nombre des mutations et des prix sur le périmètre de la Communauté urbaine de Lyon des maisons neuves, des maisons anciennes, du collectif neuf et du collectif ancien. Etant donné que le périmètre de la Communauté ne recouvre pas celui de l'aire d'étude, nous avons essayé de reconstituer les données au delà de ce périmètre. Ce travail s'est révélé impossible sur l'intégralité de l'aire du fait de la pauvreté des données disponibles. Néanmoins sur le périmètre du schéma directeur de l'agglomération lyonnaise, les données ont pu être reconstruites d'une façon satisfaisante⁴⁹.

En outre, du fait de l'hétérogénéité du parc immobilier selon les zones géographiques, nous avons opté pour la construction d'un indicateur synthétique de valeurs immobilières. En effet, la ville-centre est caractérisée par une concentration d'immeubles collectifs et une présence faible de maisons individuelles, alors que plus on s'éloigne du centre, plus le parc immobilier est caractérisé par la forte présence de maisons individuelles.

L'observation du marché s'est faite sur la période 1990 à 1996 sur chaque catégorie

⁴⁹ Ces données ont été recueillies principalement dans la revue « *Indicateur Bertrand Rhône-Alpes, Guide immobilier neuf et ancien* ».

de parc. Pour chacune de ces catégories, un prix moyen a été calculé sur l'ensemble de cette période pondéré par le nombre de mutation observé chaque année. Ensuite, ces prix ont été rapporté sur la moyenne observée sur l'ensemble des zones géographiques afin de construire un indicateur base 100 sur la moyenne de chaque catégorie. Enfin, les indicateurs ont été moyennés afin d'obtenir un indicateur global synthétique.

Tableau 8. Répartition des prix immobiliers du parc des logements collectifs anciens (observations sur la période 1990-1996)

N° zone	Nom de la zone	nombre de mutations	prix du m ²
1	Hypercentre	10 975	6 849
2	Rive Gauche	19 932	7 266
3	Lyon Sud Est	8 437	5 845
4	Lyon Sud	4 652	6 118
5	Lyon Sud Ouest	6 716	6 588
6	Lyon Ouest	5 022	5 484
7	Croix Rousse	6 274	7 135
8	Villeurbanne	7 685	5 788
9	Caluire	2 167	7 322
10	Vaulx-en-Velin	1 391	4 272
11	Bron	1 553	4 977
12	St Fons - Vénissieux	1 843	4 379
13	Ste Foy - La Mulatière - Pierre Bénite	3 785	5 616
14	Tassin - Ecully - Champagne	1 704	7 447
15	Secteur Neuville	751	5 420
16	Rillieux	657	4 712
17	Meyzieu - Jonage - Jons - Pusignan	340	4 496
18	Chassieu - Genas	59	6 458
19	St Priest	1 284	4 373
20	St Bonnet - St Laurent		
21	Corbas - Mions - St Pierre de Chandieu	198	3 732
22	Solaize - Feyzin - St Symphorien	101	3 783
23	Irigny - Vernaison - Charly	554	5 642
24	Secteur Limonest - Dardilly	636	7 086
25	Secteur Mont d'Or	296	5 489

Tableau 9. Répartition des prix immobiliers du parc des logements collectifs neufs (observations sur la

LES INTERACTIONS ENTRE SYSTEME DE TRANSPORT ET SYSTEME DE LOCALISATION EN MILIEU URBAIN ET LEUR MODELISATION

période 1990-1996)

N° zone	Nom de la zone	nombre de mutations	prix du m²
1	Hypercentre	847	10 378
2	Rive Gauche	11 844	9 570
3	Lyon Sud Est	9 126	8 803
4	Lyon Sud	3 421	9 072
5	Lyon Sud Ouest	1 615	8 751
6	Lyon Ouest	1 474	8 160
7	Croix Rousse	2 157	9 568
8	Villeurbanne	4 002	7 939
9	Caluire	626	9 672
10	Vaulx-en-Velin	82	5 411
11	Bron	320	8 912
12	St Fons - Vénissieux	110	6 500
13	Ste Foy - La Mulatière - Pierre Bénite	372	8 465
14	Tassin - Ecully - Champagne	240	9 267
15	Secteur Neuville	226	7 246
16	Rillieux	11	6 404
17	Meyzieu - Jonage - Jons - Pusignan	19	6 412
18	Chassieu - Genas	25	8 508
19	St Priest	80	7 674
20	St Bonnet - St Laurent		
21	Corbas - Mions - St Pierre de Chandieu	12	5 525
22	Solaize - Feyzin - St Symphorien	3	4 929
23	Irigny - Vernaison - Charly	178	7 458
24	Secteur Limonest - Dardilly	295	8 009
25	Secteur Mont d'Or	99	9 736

Tableau 10. Répartition des prix immobiliers du parc des maisons anciennes en milliers de francs (observations sur la période 1990-1996)

N° zone	Nom de la zone	nombre de mutations	prix du m ²
1	Hypercentre	46	1 110
2	Rive Gauche	289	1 096
3	Lyon Sud Est	564	749
4	Lyon Sud	88	915
5	Lyon Sud Ouest	395	1 163
6	Lyon Ouest	304	1 075
7	Croix Rousse	136	1 329
8	Villeurbanne	630	709
9	Caluire	398	1 094
10	Vaulx-en-Velin	263	510
11	Bron	343	854
12	St Fons - Vénissieux	503	522
13	Ste Foy - La Mulatière - Pierre Bénite	618	822
14	Tassin - Ecully - Champagne	439	1 221
15	Secteur Neuville	603	769
16	Rillieux	312	781
17	Meyzieu - Jonage - Jons - Pusignan	919	601
18	Chassieu - Genas	236	759
19	St Priest	300	675
20	St Bonnet - St Laurent		
21	Corbas - Mions - St Pierre de Chandieu	473	606
22	Solaize - Feyzin - St Symphorien	163	557
23	Irigny - Vernaison - Charly	622	789
24	Secteur Limonest - Dardilly	1 100	981
25	Secteur Mont d'Or	674	1 156

Tableau 11. Répartition des prix immobiliers du parc des maisons neuves en milliers de francs (observations sur la période 1990-1996)

LES INTERACTIONS ENTRE SYSTEME DE TRANSPORT ET SYSTEME DE LOCALISATION EN MILIEU URBAIN ET LEUR MODELISATION

N° zone	Nom de la zone	nombre de mutations	prix du m ²
1	Hypercentre		
2	Rive Gauche	28	1 431
3	Lyon Sud Est	43	1 071
4	Lyon Sud		
5	Lyon Sud Ouest	173	1 121
6	Lyon Ouest	56	1 120
7	Croix Rousse	42	2 160
8	Villeurbanne	55	741
9	Caluire	53	1 301
10	Vaulx-en-Velin	83	489
11	Bron	16	875
12	St Fons - Vénissieux	55	500
13	Ste Foy - La Mulatière - Pierre Bénite	239	635
14	Tassin - Ecully - Champagne	92	1 244
15	Secteur Neuville	100	995
16	Rillieux	49	606
17	Meyzieu - Jonage - Jons - Pusignan	130	523
18	Chassieu - Genas	58	662
19	St Priest	66	569
20	St Bonnet - St Laurent		
21	Corbas - Mions - St Pierre de Chandieu	241	521
22	Solaize - Feyzin - St Symphorien	7	396
23	Irigny - Vernaison - Charly	135	766
24	Secteur Limonest - Dardilly	225	870
25	Secteur Mont d'Or	57	1 239

Tableau 12. Indice des prix immobiliers par type de parc et indice global des valeurs immobilières

N° zone	Nom de la zone	collectif ancien en F/m²	collectif neuf en F/m²	maison neuve en MF	maison ancienne en MF	indice global
1	Hypercentre	122	131		129	128
2	Rive Gauche	130	121	162	128	135
3	Lyon Sud Est	104	111	121	87	106
4	Lyon Sud	109	115		107	110
5	Lyon Sud Ouest	118	111	127	136	123
6	Lyon Ouest	98	103	127	125	113
7	Croix Rousse	127	121	244	155	162
8	Villeurbanne	103	100	84	83	92
9	Caluire	131	122	147	128	132
10	Vaulx-en-Velin	76	68	55	59	65
11	Bron	89	113	99	100	100
12	St Fons - Vénissieux	78	82	56	61	69
13	Ste Foy - La Mulatière - Pierre Bénite	100	107	72	96	94
14	Tassin - Ecully - Champagne	133	117	141	142	133
15	Secteur Neuville	97	92	112	90	98
16	Rillieux	84	81	69	91	81
17	Meyzieu - Jonage - Jons - Pusignan	80	81	59	70	73
18	Chassieu - Genas	115	107	75	88	96
19	St Priest	78	97	64	79	80
20	St Bonnet - St Laurent	67	70	59	71	66
21	Corbas - Mions - St Pierre de Chandieu	67	70	59	71	66
22	Solaize - Feyzin - St Symphorien	68	62	45	65	60
23	Irigny -	101	94	87	92	93

N° zone	Nom de la zone	collectif ancien en F/m ²	collectif neuf en F/m ²	maison neuve en MF	maison ancienne en MF	indice global
	Vernaison - Charly					
24	Secteur Limonest - Dardilly	127	101	98	114	110
25	Secteur Mont d'Or	98	123	140	135	124

Annexe 5-1: Segmentation des activités économiques

Les activités économiques ont été segmentées entre d'une part les activités basiques, considérées comme motrices et exogènes, et d'autre part les activités induites, endogènes.

1. La détermination des activités basiques

Dans un premier temps, nous avons calculé des **quotients de localisation**. En effet, la méthode la plus souvent utilisée pour mesurer les exportations quand on dispose d'informations sur la valeur des productions sectorielles, sur leur valeur ajoutée ou sur l'emploi, est celle des « quotients de localisation ». Cette méthode revient à comparer le rapport de chacun des secteurs au total de la production urbaine locale (*c*) avec le même rapport dans une aire de référence, par exemple la nation (*n*) et quand le rapport excède l'unité on considère la proportion excédentaire comme l'expression d'un surplus net par rapport aux exigences de la demande locale, et donc d'exportations nettes :

$$Q_L = \frac{X_{ic}}{X_c} \bigg/ \frac{X_{in}}{X_n}$$

X peut être n'importe quelle variable désagrégée sectoriellement, disponible au niveau urbain et national. Nous avons considéré le nombre de personnes employées selon le type d'activités en NAP100 d'après le RGP de 1990 (cf. Tableau 13).

Parmi les activités qui présentent un quotient de localisation supérieur à l'unité, on distingue les activités qui constituent les activités de spécialisation de l'aire métropolitaine lyonnaise (les activités de chimie, parachimie, industries pharmaceutiques, etc.) et celles qui remplissent des fonctions métropolitaines, et qui sont le propre de la concentration urbaine (distribution d'eau et de chauffage urbain, activités d'études, de conseil et d'assistance, promoteurs et sociétés immobilières, location et crédit bail mobiliers,

location et crédit bail immobiliers, enseignement, recherche, santé, action sociale).

Ces différentes activités sont les activités porteuses de l'activité économique de l'agglomération. Toutefois, pour notre objectif de modélisation, l'analyse en termes de quotients de localisation ne semble pas suffisante. Elle doit être complétée par une analyse qualitative. Cette analyse qualitative se fonde sur les travaux d'extension de la théorie de la base économique et surtout sur les travaux de Savy (1994).

Tableau 13. Calculs des quotients de localisation à partir du nombre d'emplois par activité économique – Niveau 100 de la nomenclature d'activités – RGP 1990.

LES INTERACTIONS ENTRE SYSTEME DE TRANSPORT ET SYSTEME DE LOCALISATION EN MILIEU URBAIN ET LEUR MODELISATION

	NAP100	QLi 90
agriculture	01	0,47
silviculture et exploitation forestière	02	0,17
pêche	03	0,01
produc. de combustibles minéraux solides, cokéfaction	04	0,01
produc de pétrole et gaz naturel	05	1,14
produc. et distribution d'électricité	06	1,40
distribution de gaz	07	0,82
distribution d'eau et de chauffage urbain	08	1,44
extraction et préparation de minerai de fer	09	0,00
sidérurgie	10	0,21
première transformation de l'acier	11	0,67
extraction et préparation de minerais non ferreux	12	0,00
métallurgie et première transformation des métaux non ferreux	13	0,79
produc. de minéraux divers	14	0,26
produc. de matériaux de construction et de céramique	15	0,79
industrie du verre	16	1,08
industrie chimique de base	17	2,58
parachimie	18	1,25
industrie pharmaceutique	19	2,55
fonderie	20	0,92
travail des métaux	21	1,47
fabrication de machines agricoles	22	0,59
fabrication de machines-outils	23	1,46
production d'équipement industriel	24	2,60
fab. de matériel pour la manutention, les mines, le génie civil	25	1,90
industrie de l'armement	26	0,05
fab. de machines de bureau et de matériel de traitement de l'information	27	0,65

	NAP100	QLi 90
fab. de matériel électrique	28	2,13
fab. de matériel électronique ménager et professionnel	29	0,63
fab. d'équipement ménager	30	2,33
const. de véhicules et autres matériels de transport terrestre	31	1,26
construction navale	32	0,03
construction aéronautique	33	0,03
fab. d'instruments et matériel de précision	34	1,00
industrie de la viande	35	0,70
industrie laitière	36	0,71
fabrication de conserves	37	0,81
boulangerie, pâtisserie	38	0,83
travail du grain	39	0,60
fab. de produits alimentaires divers	40	0,75
fab. de boissons et alcools	41	0,53
transformation de tabac	42	0,40
industrie des fils et fibres artificiels et synthétiques	43	2,79
industrie du textile	44	1,94
industrie du cuir	45	0,58
industrie de la chaussure	46	0,37
industrie de l'habillement	47	1,20
travail mécanique du bois	48	0,50
industrie de l'ameublement	49	0,72
industrie du papier et du carton	50	0,71
imprimerie, presse, édition	51	0,88
industrie du caoutchouc	52	0,44
transformations des matières plastiques	53	1,64
industries diverses	54	1,54
industrie de mise en oeuvre du bâtiment et du génie civil et agricole	55	1,02
récupération	56	1,34
commerce de gros alimentaire	57	0,88
commerce de gros non alimentaire	58	1,22
commerce de gros interindustriel	59	1,44
intermédiaire de commerce	60	1,06

LES INTERACTIONS ENTRE SYSTEME DE TRANSPORT ET SYSTEME DE LOCALISATION EN MILIEU URBAIN ET LEUR MODELISATION

	NAP100	QLi 90
comm. de détail d'alimentation générale de grande surface	61	0,87
comm. de détail alimentaire de proximité ou spécialisé	62	0,88
comm. de détail non alimentaire non spécialisé	63	0,65
comm. de détail non alimentaire spécialisé	64	0,92
réparation et commerce de l'automobile	65	1,03
réparation diverses	66	0,96
hôtels, cafés, restaurant	67	0,83
transports ferroviaires	68	1,21
transp. routier, transp. urbains, transp. par conduite	69	1,13
navigation intérieure	70	0,73
transp. maritimes et navigation côtière	71	0,07
transp. aérien	72	0,53
activités annexes des transp. et entrepôts	73	0,84
auxiliaires de transp. et agences de voyages	74	1,43
télécommunications et postes	75	1,00
holdings	76	0,73
activités d'études, de conseil, et d'assistance	77	1,28
auxiliaires financiers et d'assurance	78	0,91
promoteurs et sctés immobilières	79	1,17
location et crédit bail mobiliers	80	1,31
location et crédit bail immobilier	81	1,13
enseignement (services marchands)	82	1,41
recherche (services marchands)	83	1,46
santé (services marchands)	84	1,00
action sociale (services marchands)	85	0,88
serv. récréatifs, culturels et sportifs (serv. marchands)	86	0,64
services divers (marchands)	87	1,07

	NAP100	QLi 90
assurances	88	0,88
organismes financiers	89	0,87
administration générale	90	0,77
prévoyance et sécurité sociale	91	0,99
enseignement (serv. non marchands)	92	1,00
recherche (serv. non marchands)	93	0,73
santé (serv. non marchands)	94	0,71
action sociale (serv. non marchands)	95	1,11
serv. récréatif, culturels et sportifs (serv. non marchands)	96	0,86
services divers fournis à la collectivité (serv. non marchands)	97	0,82
services domestiques	98	0,61
représentation diplomatique étrangère en France. Organ. interna.	99	0,72

La segmentation des activités économiques dans le modèle s'inspire fortement de l'analyse de Savy réalisée sur une décomposition en NAP40, transposée à une décomposition en NAP100. Cette segmentation se fonde principalement sur la distinction entre les activités qui s'adressent à une demande intermédiaire et les activités qui s'adressent à une demande finale, c'est-à-dire directement à la population locale. Nous avons distingué au départ trois types d'activités :

les activités basiques : ce sont principalement les activités industrielles ;

les activités liées à la base : ce sont les services aux entreprises d'un type particulier, à savoir les services para-productifs (les services marchands rendus aux entreprises, les services logistiques (commerce de gros, intermédiaires de commerce, transport, etc.) et les services rendus aux entreprises et aux particuliers liés aux activités productives, en amont (recherche, études de marché, etc.), en aval (distribution, après-vente) et parallèlement à la fabrication (organismes financiers, assurances, etc.). Ces deux types d'activités forment les activités de la base économique.

enfin, **les activités dites induites ou ordinaires** : ce sont les activités orientées vers la satisfaction des besoins de la population. Ces activités induites ont été segmentées, pour les besoins du modèle en différents types d'activités, sources de déplacements de personnes pour des motifs particuliers.

Tableau 14. Segmentation des activités économiques entre activités basiques, activités liées à la base et activités induites

B/O	SEGMENTATION	NAP100	INT_NAP100
B	ACTIVITES BASIQUES	01	agriculture
B	ACTIVITES BASIQUES	02	sylviculture et exploitation forestières
B	ACTIVITES BASIQUES	03	pêche
B	ACTIVITES BASIQUES	04	produc. de combustibles minéraux solides, cokéfaction
B	ACTIVITES BASIQUES	05	produc de pétrole et gaz naturel
B	ACTIVITES BASIQUES	09	extraction et préparation de minerai de fer
B	ACTIVITES BASIQUES	10	sidérurgie
B	ACTIVITES BASIQUES	11	première transformation de l'acier
B	ACTIVITES BASIQUES	12	extraction et préparation de minerais non ferreux
B	ACTIVITES BASIQUES	13	métallurgie et première transformation des métaux non ferreux
B	ACTIVITES BASIQUES	14	produc. de minéraux divers
B	ACTIVITES BASIQUES	15	produc. de matériaux de construction et de céramique
B	ACTIVITES BASIQUES	16	industrie du verre
B	ACTIVITES BASIQUES	17	industrie chimique de base
B	ACTIVITES BASIQUES	18	parachimie
B	ACTIVITES BASIQUES	19	industrie pharmaceutique
B	ACTIVITES BASIQUES	20	fonderie
B	ACTIVITES BASIQUES	21	travail des métaux
B	ACTIVITES BASIQUES	22	fabrication de machines agricoles

LES INTERACTIONS ENTRE SYSTEME DE TRANSPORT ET SYSTEME DE LOCALISATION EN MILIEU URBAIN ET LEUR MODELISATION

B/O	SEGMENTATION	NAP100	INT_NAP100
B	ACTIVITES BASIQUES	23	fabrication de machines-outils
B	ACTIVITES BASIQUES	24	production d'équipement industriel
B	ACTIVITES BASIQUES	25	fab. de matériel pour la manutention, les mines, le génie civil
B	ACTIVITES BASIQUES	26	industrie de l'armement
B	ACTIVITES BASIQUES	27	fab. de machines de bureau et de matériel de traitement de l'information
B	ACTIVITES BASIQUES	28	fab. de matériel électrique
B	ACTIVITES BASIQUES	29	fab. de matériel électronique ménager et professionnel
B	ACTIVITES BASIQUES	30	fab. d'équipement ménager
B	ACTIVITES BASIQUES	31	const. de véhicules et autres matériels de transport terrestre
B	ACTIVITES BASIQUES	32	construction navale
B	ACTIVITES BASIQUES	33	construction aéronautique
B	ACTIVITES BASIQUES	34	fab. d'instruments et matériel de précision
B	ACTIVITES BASIQUES	35	industrie de la viande
B	ACTIVITES BASIQUES	36	industrie laitière
B	ACTIVITES BASIQUES	37	fabrication de conserves
B	ACTIVITES BASIQUES	39	travail du grain
B	ACTIVITES BASIQUES	40	fab. de produits alimentaires divers
B	ACTIVITES BASIQUES	41	fab. de boissons et alcools
B	ACTIVITES BASIQUES	42	transformation de tabac
B	ACTIVITES	43	industrie des fils et

B/O	SEGMENTATION	NAP100	INT_NAP100
	BASIQUES		fibres artificiels et synthétiques
B	ACTIVITES BASIQUES	44	industrie du textile
B	ACTIVITES BASIQUES	45	industrie du cuir
B	ACTIVITES BASIQUES	46	industrie de la chaussure
B	ACTIVITES BASIQUES	47	industrie de l'habillement
B	ACTIVITES BASIQUES	48	travail mécanique du bois
B	ACTIVITES BASIQUES	49	industrie de l'ameublement
B	ACTIVITES BASIQUES	50	industrie du papier et du carton
B	ACTIVITES BASIQUES	51	imprimerie, presse, édition
B	ACTIVITES BASIQUES	52	industrie du caoutchouc
B	ACTIVITES BASIQUES	53	transformations des matières plastiques
B	ACTIVITES BASIQUES	54	industries diverses
B	ACTIVITES BASIQUES	55	industrie de mise en oeuvre du bâtiment et du génie civil et agricole
B	ACTIVITES LIEES A LA BASE	56	récupération
B	ACTIVITES LIEES A LA BASE	57	commerce de gros alimentaire
B	ACTIVITES LIEES A LA BASE	58	commerce de gros non alimentaire
B	ACTIVITES LIEES A LA BASE	59	commerce de gros interindustriel
B	ACTIVITES LIEES A LA BASE	60	intermédiaire de commerce
B	ACTIVITES LIEES A LA BASE	67	hôtels, cafés, restaurant
B	ACTIVITES LIEES A LA BASE	68	transports ferroviaires
B	ACTIVITES LIEES A LA BASE	69	transp. routier, transp. urbains, transp. par

LES INTERACTIONS ENTRE SYSTEME DE TRANSPORT ET SYSTEME DE LOCALISATION EN MILIEU URBAIN ET LEUR MODELISATION

B/O	SEGMENTATION	NAP100	INT_NAP100
			conduite
B	ACTIVITES LIEES A LA BASE	70	navigation intérieure
B	ACTIVITES LIEES A LA BASE	71	transp. maritimes et navigation côtière
B	ACTIVITES LIEES A LA BASE	72	transp. aérien
B	ACTIVITES LIEES A LA BASE	73	activités annexes des transp. et entrepôts
B	ACTIVITES LIEES A LA BASE	74	auxiliaires de transp. et agences de voyages
B	ACTIVITES LIEES A LA BASE	76	holdings
B	ACTIVITES LIEES A LA BASE	77	activités d'études, de conseil, et d'assistance
B	ACTIVITES LIEES A LA BASE	78	auxiliaires financiers et d'assurance
B	ACTIVITES LIEES A LA BASE	79	promoteurs et scétés immobilières
B	ACTIVITES LIEES A LA BASE	80	location et crédit bail mobiliers
B	ACTIVITES LIEES A LA BASE	81	location et crédit bail immobilier
B	ACTIVITES LIEES A LA BASE	83	recherche (services marchands)
B	ACTIVITES LIEES A LA BASE	88	assurances
B	ACTIVITES LIEES A LA BASE	89	organismes financiers
O	ACTIVITES INDUITES	06	produc. et distribution d'électricité
O	ACTIVITES INDUITES	07	distribution de gaz
O	ACTIVITES INDUITES	08	distribution d'eau et de chauffage urbain
O	ACTIVITES INDUITES	38	boulangerie, pâtisserie
O	ACTIVITES INDUITES	61	comm. de détail d'alimentation générale de grande surface
O	ACTIVITES INDUITES	62	comm. de détail alimentaire de proximité ou spécialisé
O	ACTIVITES INDUITES	63	comm. de détail non alimentaire non spécialisé

B/O	SEGMENTATION	NAP100	INT_NAP100
O	ACTIVITES INDUITES	64	comm. de détail non alimentaire spécialisé
O	ACTIVITES INDUITES	65	réparation et commerce de l'automobile
O	ACTIVITES INDUITES	66	réparation diverses
O	ACTIVITES INDUITES	75	télécommunications et postes
O	ACTIVITES INDUITES	82	enseignement (services marchands)
O	ACTIVITES INDUITES	84	santé (services marchands)
O	ACTIVITES INDUITES	85	action sociale (services marchands)
O	ACTIVITES INDUITES	86	serv. récréatifs, culturels et sportifs (serv. marchands)
O	ACTIVITES INDUITES	87	services divers (marchands)
O	ACTIVITES INDUITES	90	administration générale
O	ACTIVITES INDUITES	91	prévoyance et sécurité sociale
O	ACTIVITES INDUITES	92	enseignement (serv. non marchands)
O	ACTIVITES INDUITES	93	recherche (serv. non marchands)
O	ACTIVITES INDUITES	94	santé (serv. non marchands)
O	ACTIVITES INDUITES	95	action sociale (serv. non marchands)
O	ACTIVITES INDUITES	96	serv. récréatif, culturels et sportifs (serv. non marchands)
O	ACTIVITES INDUITES	97	services divers fournis à la collectivité (serv. non marchands)
O	ACTIVITES INDUITES	98	services domestiques
O	ACTIVITES INDUITES	99	représentation diplomatique étrangère en France. Organ. interna.

2. La segmentation des activités induites

Les activités induites ont été segmentées en plusieurs types d'activités liés aux besoins de la population. On distingue ainsi cinq types d'activités induites :

- . les activités de commerce (COMM),
- . les activités récréatives (LOIS),
- . les activités de l'enseignement (ENSE),
- . les activités de services (administratifs et de santé) (DEMA),
- . les autres activités de services (AUTR).

Tableau 15. Segmentation des activités induites

DETAIL	NAP100	INT_NAP100
COMM	38	boulangerie, pâtisseries
COMM	61	comm. de détail d'alimentation générale de grande surface
COMM	62	comm. de détail alimentaire de proximité ou spécialisé
COMM	63	comm. de détail non alimentaire non spécialisé
COMM	64	comm. de détail non alimentaire spécialisé
COMM	65	réparation et commerce de l'automobile
COMM	66	réparation diverses
DEMA	84	santé (services marchands)
DEMA	85	action sociale (services marchands)
DEMA	87	services divers (marchands)
DEMA	90	administration générale
DEMA	91	prévoyance et sécurité sociale
DEMA	94	santé (serv. non marchands)
DEMA	95	action sociale (serv. non marchands)
DEMA	99	représentation diplomatique étrangère en France Organ. Interna.
ENSE	82	Enseignement (services marchands)
ENSE	92	enseignement (serv. non marchands)
ENSE	93	recherche (serv. non marchands)
LOIS	86	serv. récréatifs, culturels et sportifs (serv. marchands)
LOIS	96	serv. récréatif, culturels et sportifs (serv non marchands)
AUTR	98	services domestiques
AUTR	06	produc. et distribution d'électricité
AUTR	07	distribution de gaz
AUTR	08	distribution d'eau et de chauffage urbain
AUTR	75	télécommunications et postes
AUTR	97	services divers fournis à la collectivité (serv non marchands)

Annexe 5-2 : La répartition spatiale des résidents et des activités induites : les tentatives d'ajustement

1. La répartition spatiale des résidents

Différents ajustements statistiques ont été testés pour sélectionner la spécification de la fonction de répartition spatiale des localisations des résidents.

La variable à expliquer est P_{POP_i} est la proportion de résidents dans une zone i donnée.

$$P_{POP_i} = a_1 \cdot \ln(ACC_POP_i) + const_1$$

	R ²	0,44	R ² aj	0,41
variables	coefficient	erreur de Student	t ratio	Pr ob > t
const	-0,2648	0,0719	-3,68	0,00012
ln(ACC_POP i)	0,030	0,0071	4,24	0,0003

$$P_{POP_i} = a_1 \cdot ACC_POP_i + const_1$$

	R ²	0,55	R ² aj	0,53
variables	coefficient	erreur de Student	t ratio	Pr ob > t
const	0,0052	0,00719	0,72	0,4771
ACC_POP i	0,0000012	2,241*10-7	5,32	< ;,0001

$$P_{POP_i} = a_1 \cdot ACC_POP_i + b_1 \cdot P_IMMO_i + const_1$$

	R ²	0,58	R ² aj	0,54
variables	coefficient	erreur de Student	t ratio	Pr ob > t
const	0,0181	0,013142	1,37	0,1831
ACC_POP i	0,0000013	2,36*10-7	5,45	< ;,0001
P_IMMO i	-0,000154	0,000132	-1,17	0,2562

$$P_{POP_i} = a_1 \cdot ACC_POP_i + b_1 \cdot P_IMMO_i + c_1 \cdot DENS_POP_i + const_1$$

	R ²	0,58	R ² aj	0,52
variables	coefficient	erreur de Student	t ratio	Pr.ob > t
const	0,0194	0,016255	1,20	0,2452
ACC_POP i	0,0000013	3,347*10 ⁻⁷	3,73	0,0012
P_IMMO i	-0,0002	0,000152	-1,08	0,2905
DENS_POP i	0,0000001	9,906*10 ⁻⁷	0,15	0,8822

$$P_{POP_i} = a_1 \cdot \ln(ACC_POP_i) + b_1 \cdot \ln(P_IMMO_i) + const_1$$

	R ²	0,45	R ² aj	0,40
variables	coefficient	erreur de Student	t ratio	Pr.ob > t
const	-0,2346	0,0837	-2,80	0,0104
ln (ACC_POP i)	0,0319	0,0076	4,19	0,0004
ln (P_IMMO i)	-0,0107	0,0148	-0,73	0,4750

2. La répartition spatiale des activités induites

21. La répartition spatiale des activités de commerce

$$P_{COM_i} = a_2 \cdot \ln(ACC_COM_i) + b_2 \cdot \ln(DENS_EMP_i) + const_2$$

	R ²	0,73	R ² aj	0,70
variables	coefficient	erreur de Student	t ratio	Pr.ob > t
Const ₂	-0,3907	0,0798	-4,90	< ;,0001
ln (ACC_COM i)	0,0477	0,0115	4,16	0,0004
ln (DENS_EMP i)	0,0007	0,0043	0,16	0,8729

$$P_{COM_i} = a_2 \cdot \ln(ACC_COM_i) + b_2 \cdot \ln(P_IMMO_i) + const_2$$

	R ²	0,73	R ² aj	0,71
variables	coefficient	erreur de Student	t ratio	Pr.ob > t
Const ₂	-0,3802	0,0690	-5,51	< ;,0001
ln (ACC_COM i)	0,0504	0,0068	7,43	< ;,0001
ln (P_IMMO i)	0,0065	0,0129	-0,50	0,6198

$$P_{COM_i} = a_2 \cdot \ln(ACC_COM_i) + b_2 \cdot \ln(EMP_i) + const_2$$

EMP_i le nombre d'emplois total dans la zone i .

	R ²	0,86	R ² aj	0,85
variables	coefficient	erreur de Student	t ratio	Pr ob > t
Const ₂	-0,3903	0.0413	-9.44	< ;,0001
ln (ACC_COM i)	0,0097	0.0098	0.99	0.3343
ln (EMP i)	0,0349	0.0077	4.56	0.0002

$$P_{COM_i} = a_2 \cdot ACC_COM_i + b_2 \cdot \ln(P_IMMO_i) + c_2 \cdot \ln(DENS_EMP_i) + const_2$$

EMP_i le nombre d'emplois total dans la zone i .

	R ²	0,81	R ² aj	0,78
variables	coefficient	erreur de Student	t ratio	Pr ob > t
Const ₂	-0,0111	0,0515	-0,22	0,8313
ACC_COM i	0,000006	0,000001	5,29	< ;,0001
ln (P_IMMO i)	-0,0005	0,0138	-0,04	0,9692
ln (DENS_EMP i)	0,0008	0,0042	0,18	0,8559

$$P_{COM_i} = a_2 \cdot ACC_COM_i + b_2 \cdot \ln(P_IMMO_i) + const_2$$

EMP_i le nombre d'emplois total dans la zone i .

	R ²	0,81	R ² aj	0,79
variables	coefficient	erreur de Student	t ratio	Pr ob > t
Const ₂	-0,014	0,0474	-0,30	0,7654
ACC_COM i	0,000006	6,187 ^e -7	9,35	< ;,0001
ln (P_IMMO i)	0,0010	0,0106	0,10	0,9231

$$P_{COM_i} = a_2 \cdot ACC_COM_i + b_2 \cdot P_IMMO_i + const_2$$

EMP_i le nombre d'emplois total dans la zone i .

	R ²	0,81	R ² aj	0,79
variables	coefficient	erreur de Student	t ratio	Pr.ob > t
Const ₂	-0,011	0,0112	-0,98	0,3377
ACC_COM _i	0,000006	6,156 ^{e-7}	9,39	< ;,0001
P_IMMO _i	0,00001	0,0001	0,13	0,8953

$$P_{COM_i} = a_2 \cdot ACC_COM_i + b_2 \cdot P_IMMO_i + c_2 \cdot DENS_EMP_i + const_2$$

EMP_i le nombre d'emplois total dans la zone i.

	R ²	0,85	R ² aj	0,83
variables	coefficient	erreur de Student	t ratio	Pr.ob > t
Const ₂	0,0016	0,0113	0,14	0,8895
ACC_COM _i	0,000005	6,511 ^{e-7}	7,58	< ;,0001
P_IMMO _i	-0,00008	0,0001	-0,80	0,4320
DENS_EMP _i	0,000002	7,518 ^{e-7}	2,48	0,0217

22. La répartition spatiale des activités de services

$$P_{SERV_i} = a_3 \cdot \ln(ACC_SERV_i) + b_3 \cdot \ln(DENS_EMP_i) + const_3$$

	R ²	0,56	R ² aj	0,52
variables	coefficient	erreur de Student	t ratio	Pr.ob > t
Const ₃	-0,4407	0,1663	-2,65	0,0146
ln(ACC_ADM _i)	0,0465	0,0228	2,04	0,0538
ln(DENS_EMP _i)	0,0067	0,0084	0,80	0,4348

$$P_{SERV_i} = a_3 \cdot ACC_SERV_i + const_3$$

	R ²	0,81	R ² aj	0,80
variables	coefficient	erreur de Student	t ratio	Pr.ob > t
Const ₃	-0,011	0,0059	-1,84	0,0792
ACC_SERV _i	0,000004	4,114 ^{e-7}	9,82	< ;,0001

$$P_{SERV_i} = a_3 \cdot \ln(ACC_SERV_i) + const_3$$

LES INTERACTIONS ENTRE SYSTEME DE TRANSPORT ET SYSTEME DE LOCALISATION EN MILIEU URBAIN ET LEUR MODELISATION

	R²	0,55	R²aj	0,53
<i>variables</i>	<i>coefficient</i>	<i>erreur de Student</i>	<i>t ratio</i>	<i>Pr ob > t </i>
Const ₃	-0,5394	0,1099	-4,91	< ;,0001
ln(ACC_SERV _i)	0,062	0,0117	5,27	< ;,0001

$$P_{SERV_i} = a_3 \cdot \ln(ACC_SERV_i) + b_3 \cdot DENS_SERV_i + const_3$$

	R²	0,68	R²aj	0,65
<i>variables</i>	<i>coefficient</i>	<i>erreur de Student</i>	<i>t ratio</i>	<i>Pr ob > t </i>
Const ₃	-0,3537	0,1133	-3,12	0,0050
ln(ACC_SERV _i)	0,041	0,0123	3,32	0,0031
DENS_SERV _i	0,00002	0,000006	2,99	0,0067

$$P_{SERV_i} = a_3 \cdot \ln(ACC_SERV_i) + b_3 \cdot \ln(DENS_SERV_i) + const_3$$

	R²	0,59	R²aj	0,55
<i>variables</i>	<i>coefficient</i>	<i>erreur de Student</i>	<i>T ratio</i>	<i>Pr ob > t </i>
Const ₃	-0,3677	0,1592	-2,31	0,0307
ln(ACC_SERV _i)	0,0389	0,0195	1,99	0,0594
ln(DENS_SERV _i)	0,0087	0,0059	1,46	0,1584

$$P_{SERV_i} = a_3 \cdot ACC_SERV_i + b_3 \cdot \ln(P_IMMO_i) + c_3 \cdot \ln(DENS_EMP_i) + const_3$$

	R²	0,71	R²aj	0,67
<i>variables</i>	<i>coefficient</i>	<i>erreur de Student</i>	<i>T ratio</i>	<i>Pr ob > t </i>
Const ₃	-0,1312	0,0905	-1,45	0,1619
ACC_SERV _i	0,000006	0,000001	4,08	0,0005
ln(P_IMMO _i)	0,0275	0,0244	1,13	0,2718
ln(DENS_EMP _i)	-0,0042	0,0079	-0,53	0,6021

$$P_{SERV_i} = a_3 \cdot ACC_SERV_i + b_3 \cdot \ln(P_IMMO_i) + const_3$$

	R ²	0,71	R ² aj	0,68
variables	coefficient	erreur de Student	T ratio	Pr.ob > t
Const ₃	-0,1157	0,0842	-1,37	0,1833
ACC_SERV _i	0,000005	7,695 ^e -7	6,63	< ;,0001
ln(P_IMMO _i)	0,0195	0,0189	1,04	0,3113

$$P_{SERV_i} = a_3 \cdot ACC_SERV_i + b_3 \cdot P_IMMO_i + const_3$$

	R ²	0,70	R ² aj	0,68
variables	coefficient	erreur de Student	T ratio	Pr.ob > t
Const ₃	-0,0453	0,0199	-2,28	0,0328
ACC_SERV _i	0,000005	7,683 ^e -7	6,68	< ;,0001
P_IMMO _i	0,0002	0,0002	0,97	0,3441

$$P_{SERV_i} = a_3 \cdot ACC_SERV_i + b_3 \cdot P_IMMO_i + c_3 \cdot DENS_EMP_i + const_3$$

	R ²	0,72	R ² aj	0,68
variables	coefficient	erreur de Student	T ratio	Pr.ob > t
Const ₃	-0,0337	0,0222	-1,52	0,1431
ACC_SERV _i	0,000005	9,123 ^e -7	5,00	< ;,0001
P_IMMO _i	0,0001	0,0002	0,49	0,6260
DENS_EMP _i	0,000002	0,000001	1,14	0,2669

$$P_{SERV_i} = a_2 \cdot \ln(ACC_SERV_i) + b_2 \cdot \ln(P_IMMO_i) + c_2 \cdot \ln(DENS_EMP_i) + const_2$$

	R ²	0,56	R ² aj	0,50
variables	coefficient	erreur de Student	t ratio	Pr.ob > t
Const ₂	-0,4774	0,2372	-2,01	0,0572
ln(ACC_SERV _i)	0,0482	0,0245	1,96	0,0631
ln(P_IMMO _i)	0,0064	0,0291	0,22	0,8267
ln(DENS_EMP _i)	0,0054	0,0103	0,53	0,6039

23. La répartition spatiale des activités de loisirs

$$P_{LOIS_i} = a_4 \cdot \ln(ACC_LOIS_i) + b_4 \cdot \ln(P_IMMO_i) + c_4 \cdot \ln(DENS_EMP_i) + const_4$$

	R ²	0,62	R ² aj	0,57
variables	coefficient	erreur de Student	T ratio	Pr ob > ; t
Const ₄	-0,3691	0,2352	-1,57	0,1315
ln(ACC_LOIS _i)	0,0335	0,0242	1,38	0,1809
ln(P_IMMO _i)	-0,0011	0,0280	-0,04	0,9678
ln(DENS_EMP _i)	0,0140	0,0101	1,39	0,1798

$$P_{LOIS_i} = a_4 \cdot \ln(ACC_LOIS_i) + b_4 \cdot \ln(DENS_EMP_i) + const_4$$

	R ²	0,62	R ² aj	0,59
variables	coefficient	erreur de Student	T ratio	Pr ob > ; t
Const ₄	-0,3757	0,1658	-2,27	0,0337
ln(ACC_LOIS _i)	0,0338	0,0224	1,51	0,1456
ln(DENS_EMP _i)	0,0137	0,0082	1,68	0,1075

$$P_{LOIS_i} = a_4 \cdot \ln(ACC_LOIS_i) + b_4 \cdot \ln(DENS_LOIS_i) + const_4$$

	R ²	0,66	R ² aj	0,63
variables	coefficient	erreur de Student	T ratio	Pr ob > ; t
Const ₄	-0,2746	0,1644	-1,67	0,1090
ln(ACC_LOIS _i)	0,0302	0,0184	1,64	0,1148
ln(DENS_LOIS _i)	0,0132	0,0054	2,42	0,0241

$$P_{LOIS_i} = a_4 \cdot ACC_LOIS_i + const_4$$

	R ²	0,73	R ² aj	0,72
variables	coefficient	erreur de Student	T ratio	Pr ob > ; t
Const ₄	-0,0347	0,0104	-3,34	0,0028
ACC_LOIS _i	0,000005	6,431 ^{e-7}	7,97	< ;,0001

$$P_{LOIS_i} = a_4 \cdot \ln(ACC_LOIS_i) + const_4$$

	R ²	0,57	R ² aj	0,55
variables	coefficient	erreur de Student	T ratio	Pr ob > ; t
Const ₄	-0,5863	0,1126	-5,21	< ;,0001
ln(ACC_LOIS _i)	0,0662	0,0119	5,56	< ;,0001

$$P_{LOIS_i} = a_4 \cdot ACC_LOIS_i + b_4 \cdot \ln(EMP_TOT_i) + const_4$$

	R ²	0,74	R ² aj	0,72
variables	coefficient	erreur de Student	T ratio	Pr.ob > t
Const ₄	-0,0625	0,0301	-2,08	0,0497
ACC_LOIS _i	0,000004	0,000001	3,75	0,0011
ln(EMP_TOT _i)	0,006	0,0060	0,98	0,3363

$$P_{LOIS_i} = a_4 \cdot \ln(ACC_LOIS_i) + b_4 \cdot \ln(DENS_EMP_i) + const_4$$

	R ²	0,62	R ² aj	0,59
variables	coefficient	erreur de Student	T ratio	Pr.ob > t
Const ₄	-0,3757	0,1658	-2,27	0,0337
ln(ACC_LOIS _i)	0,0338	0,0224	1,51	0,1456
ln(DENS_EMP _i)	0,0138	0,0082	1,68	0,1075

$$P_{LOIS_i} = a_4 \cdot ACC_LOIS_i + b_4 \cdot \ln(P_IMMO_i) + c_4 \cdot \ln(DENS_EMP_i) + const_4$$

	R ²	0,75	R ² aj	0,72
variables	coefficient	erreur de Student	T ratio	Pr.ob > t
Const ₄	-0,1360	0,0862	-1,58	0,1295
ACC_LOIS _i	0,000005	0,000001	3,79	0,0011
ln(P_IMMO _i)	0,0212	0,0233	0,91	0,3729
ln(DENS_EMP _i)	0,0016	0,0077	0,21	0,8371

$$P_{LOIS_i} = a_4 \cdot ACC_LOIS_i + b_4 \cdot \ln(P_IMMO_i) + const_4$$

	R ²	0,75	R ² aj	0,73
variables	coefficient	erreur de Student	T ratio	Pr.ob > t
Const ₄	-0,1417	0,0799	-1,77	0,0898
ACC_LOIS _i	0,000005	6,591 ^e -7	7,39	< ;,0001
ln(P_IMMO _i)	0,0242	0,018	1,35	0,1906

$$P_{LOIS_i} = a_4 \cdot ACC_LOIS_i + b_4 \cdot P_IMMO_i + const_4$$

	R ²	0,75	R ² aj	0,73
variables	coefficient	erreur de Student	T ratio	Pr.ob > t
Const ₄	-0,0553	0,0188	-2,94	0,0076
ACC_LOIS _i	0,000005	6,579 ^e -7	7,44	< ;,0001
P_IMMO _i	0,0002	0,0002	1,30	0,2066

$$P_{LOIS_i} = a_4 \cdot ACC_LOIS_i + b_4 \cdot P_IMMO_i + c_4 \cdot DENS_EMP_i + const_4$$

	R ²	0,85	R ² aj	0,83
variables	coefficient	erreur de Student	T ratio	Pr.ob > t
Const ₄	-0,0267	0,0168	-1,58	0,1281
ACC_LOIS _i	0,000004	6,289 ^e -7	5,73	< ;,0001
P_IMMO _i	0,00003	0,0001	0,20	0,8399
DENS_EMP _i	0,000004	0,000001	3,71	0,0013

24. La répartition spatiale des activités de l'enseignement

$$P_{ENSE_i} = a_5 \cdot \ln(ACC_ENSE_i) + b_5 \cdot \ln(P_IMMO_i) + c_5 \cdot \ln(DENS_EMP_i) + const_5$$

	R ²	0,67	R ² aj	0,63
variables	coefficient	erreur de Student	T ratio	Pr.ob > t
Const ₅	-0,3019	0,1819	-1,66	0,119
ln(ACC_ENSE _i)	0,0387	0,0194	1,99	0,0597
ln(P_IMMO _i)	-0,0137	0,0202	-0,68	0,5044
ln(DENS_EMP _i)	0,0078	0,0077	1,00	0,3267

$$P_{ENSE_i} = a_5 \cdot \ln(ACC_ENSE_i) + b_5 \ln(P_IMMO_i) + const_5$$

	R ²	0,66	R ² aj	0,63
variables	coefficient	erreur de Student	T ratio	Pr.ob > t
Const ₅	-0,4606	0,0900	-5,12	< ;,0001
ln(ACC_ENSE _i)	0,0559	0,0091	6,16	< ;,0001
ln(P_IMMO _i)	-0,0014	0,0161	-0,09	0,9290

$$P_{ENSE_i} = a_5 \cdot \ln(ACC_ENSE_i) + b_5 \ln(DENS_EMP_i) + const_5$$

	R ²	0,67	R ² aj	0,64
variables	coefficient	erreur de Student	T ratio	Pr.ob > t
Const ₅	-0,3915	0,1237	-3,16	0,0045
ln(ACC_ENSE _i)	0,0441	0,0175	2,52	0,0197
ln(DENS_EMP _i)	0,0046	0,0061	0,75	0,4586

$$P_{ENSE_i} = a_5 \cdot \ln(ACC_ENSE_i) + const_5$$

	R ²	0,66	R ² aj	0,64
variables	coefficient	erreur de Student	T ratio	Pr.ob > t
Const ₅	-0,4647	0,0759	-6,12	< ;,0001
ln(ACC_ENSE _i)	0,0557	0,0084	6,66	< ;,0001

$$P_{ENSE_i} = a_5 \cdot ACC_ENSE_i + const_5$$

	R ²	0,73	R ² aj	0,72
variables	coefficient	erreur de Student	T ratio	Pr.ob > t
Const ₅	-0,0183	0,0082	-2,23	0,0359
ACC_ENSE _i	0,000006	7,671 ^{e-7}	7,87	< ;,0001

$$P_{ENSE_i} = a_5 \cdot ACC_ENSE_i + b_5 \cdot P_IMMO_i + const_5$$

	R ²	0,73	R ² aj	0,70
variables	coefficient	erreur de Student	T ratio	Pr.ob > t
Const ₅	-0,0195	0,0148	-1,32	0,2017
ACC_ENSE _i	0,000006	8,143 ^{e-7}	7,38	< ;,0001
P_IMMO _i	0,00001	0,0001	0,10	0,9221

$$P_{ENSE_i} = a_5 \cdot ACC_ENSE_i + b_5 \cdot P_IMMO_i + c_5 \cdot DENS_EMP_i + const_5$$

	R ²	0,73	R ² aj	0,69
variables	coefficient	erreur de Student	T ratio	Pr.ob > t
Const ₅	-0,019	0,0173	-1,09	0,2895
ACC_ENSE _i	0,000006	0,000001	5,81	< ;,0001
P_IMMO _i	0,00001	0,0001	0,06	0,9509
DENS_EMP _i	9,2466 ^{e-8}	0,000001	0,08	0,9382

$$P_{ENSE_i} = a_5 \cdot ACC_ENSE_i + b_5 \cdot DENS_EMP_i + const_5$$

	R ²	0,73	R ² aj	0,70
<i>variables</i>	<i>coefficient</i>	<i>erreur de Student</i>	<i>T ratio</i>	<i>Pr ob > t </i>
Const ₅	-0,0179	0,0090	-1,99	0,0594
ACC_ENSE _i	0,000006	0,000001	5,95	< ,0001
DENS_EMP _i	0,0000001	0,000001	0,11	0,9132

$$P_{ENSE_i} = a_5 \cdot ACC_ENSE_i + b_5 \cdot \ln(DENS_EMP_i) + const_5$$

	R ²	0,73	R ² aj	0,71
<i>variables</i>	<i>coefficient</i>	<i>erreur de Student</i>	<i>T ratio</i>	<i>Pr ob > t </i>
Const ₅	-0,0317	0,0235	-1,35	0,1906
ACC_ENSE _i	0,000005	0,000001	3,66	0,0014
ln(DENS_EMP _i)	0,003	0,0049	0,61	0,5477

$$P_{ENSE_i} = a_5 \cdot ACC_ENSE_i + b_5 \cdot \ln(P_IMMO_i) + const_5$$

	R ²	0,73	R ² aj	0,70
<i>variables</i>	<i>coefficient</i>	<i>erreur de Student</i>	<i>T ratio</i>	<i>Pr ob > t </i>
Const ₅	-0,0322	0,0625	-0,52	0,6111
ACC_ENSE _i	0,000006	8,166 ^e -7	7,33	< ,0001
ln(P_IMMO _i)	0,0032	0,0140	0,23	0,8241

$$P_{ENSE_i} = a_5 \cdot ACC_ENSE_i + b_5 \cdot \ln(P_IMMO_i) + c_5 \cdot \ln(DENS_EMP_i) + const_5$$

	R ²	0,73	R ² aj	0,70
<i>variables</i>	<i>coefficient</i>	<i>erreur de Student</i>	<i>T ratio</i>	<i>Pr ob > t </i>
Const ₅	-0,0181	0,0678	-0,27	0,7923
ACC_ENSE _i	0,000005	0,000002	3,10	0,0055
ln(P_IMMO _i)	-0,0040	0,0187	-0,22	0,8316
ln(DENS_EMP _i)	0,0039	0,0065	0,59	0,5583

25. La répartition spatiale des autres activités induites

$$P_{AUTR_i} = a_5 \cdot \ln(ACC_AUTR_i) + b_5 \cdot \ln(P_IMMO_i) + c_5 \cdot \ln(DENS_EMP_i) + const_5$$

	R ²	0,68	R ² aj	0,64
variables	coefficient	erreur de Student	T ratio	Pr.ob > t
Const ₅	-0,1945	0,1064	-1,83	0,0818
ln(ACC_AUTR i)	0,0365	0,0110	3,31	0,0033
ln(P_IMMO i)	-0,0230	0,0169	-1,36	0,1879
ln(DENS_EMP i)	0,0058	0,0050	1,16	0,2577

$$PAUTR_i = a_5 \cdot \ln(ACC_AUTR_i) + b_5 \cdot \ln(DENS_EMP_i) + const_5$$

	R ²	0,65	R ² aj	0,62
variables	coefficient	erreur de Student	T ratio	Pr.ob > t
Const ₅	-0,3062	0,0691	-4,43	0,0002
ln(ACC_AUTR i)	0,0404	0,0108	3,74	0,0011
ln(DENS_EMP i)	0,0020	0,0042	0,48	0,6373

$$PAUTR_i = a_5 \cdot \ln(ACC_AUTR_i) + b_5 \cdot \ln(DENS_AUTR_i) + const_5$$

	R ²	0,66	R ² aj	0,63
variables	coefficient	erreur de Student	T ratio	Pr.ob > t
Const ₅	-0,2876	0,0678	-4,24	0,0003
ln(ACC_AUTR i)	0,0366	0,0105	3,47	0,0022
ln(DENS_AUTR i)	0,0041	0,0042	0,97	0,3422

$$PAUTR_i = a_5 \cdot ACC_AUTR_i + const_5$$

	R ²	0,82	R ² aj	0,81
variables	coefficient	erreur de Student	T ratio	Pr.ob > t
Const ₄	-0,009	0,0054	-1,70	0,1035
ACC_AUTR i	0,00001	0,000001	10,33	< ;,0001

$$PAUTR_i = a_5 \cdot \ln(ACC_AUTR_i) + const_5$$

	R ²	0,65	R ² aj	0,63
variables	coefficient	erreur de Student	T ratio	Pr.ob > t
Const ₄	-0,325	0,0558	-5,83	< ;,0001
ln(ACC_AUTR i)	0,0444	0,0068	6,55	< ;,0001

$$P_{AUTR_i} = a_5 \cdot \ln(ACC_AUTR_i) + b_5 \cdot \ln(DENS_EMP_i) + const_5$$

	R ²	0,65	R ² aj	0,62
variables	coefficient	erreur de Student	T ratio	Pr ob > ; t
Const ₅	-0,3062	0,0691	-4,43	0,0002
ln(ACC_AUTR i)	0,0404	0,0108	3,74	0,0011
ln(DENS_EMP i)	0,0020	0,0042	0,48	0,6373

$$P_{AUTR_i} = a_5 \cdot \ln(ACC_AUTR_i) + b_5 \cdot \ln(EMP_i) + const_5$$

	R ²	0,87	R ² aj	0,86
variables	coefficient	erreur de Student	T ratio	Pr ob > ; t
Const ₅	-0,3689	0,0348	-10,59	< ;,0001
ln(ACC_AUTR i)	-0,0014	0,0084	-0,17	0,8670
ln(EMP i)	0,0426	0,0068	6,28	< ;,0001

$$P_{AUTR_i} = a_5 \cdot \ln(ACC_AUTR_i) + b_5 \cdot DENS_AUTR_i + const_5$$

	R ²	0,70	R ² aj	0,67
variables	coefficient	erreur de Student	T ratio	Pr ob > ; t
Const ₅	-0,2720	0,0596	-4,57	0,0002
ln(ACC_AUTR i)	0,0374	0,0074	5,07	< ;,0001
DENS_AUTR i	0,000003	0,000001	1,92	0,0679

Annexe 5-3 : L'algorithme de recherche du plus court chemin

1. Le problème

Nous définissons, sur un réseau dont les arcs ont une longueur, la longueur d'un chemin comme la somme des longueurs des arcs qui le composent. Un algorithme de recherche du plus court chemin entre deux sommets doit livrer la description d'un des chemins de longueur minimale joignant le sommet d'origine au sommet de destination.

2. Principes des solutions

Le principe de base est attribué à Bellman : décrivant un plus court chemin par $\{s_0, \dots, s_k, s_{k+1}, \dots, s_m\}$ la liste des extrémités terminales des arcs le composant, alors tout chemin extrait $\{s_i, s_{i+1}, \dots, s_j\}$ est un plus court chemin entre les noeuds s_i et s_j .

Les algorithmes visent tous à améliorer progressivement la connaissance des longueurs minimales d'accès aux différentes noeuds du réseau depuis le sommet d'origine. L'amélioration se mesure en suivant l'évolution d'une fonction **LAMC** « **longueur d'accès minimale connue** », définie pour chaque noeud du réseau.

L'état initial de la recherche est défini par

LAMC(r) = 0 où r note le noeud d'origine,

LAMC(i) = $+\infty$ où i note tout autre noeud que r.

La condition de stabilité d'un état intermédiaire, autrement dit la condition de finalité d'un état, notant 1_a la longueur de l'arc a, s'écrit

$$\text{LAMC}(B_a) + 1_a \geq \text{LAMC}(E_a) \text{ quel que soit l'arc du réseau.}$$

où E_a est l'extrémité terminale des arcs de A.

Cela signifie qu'on ne peut améliorer le temps (synonyme ici de la longueur) d'accès à l'extrémité terminale de l'arc en modifiant le moyen d'accès à son extrémité initiale.

Le passage d'un état intermédiaire à un autre consiste à tenter de faire décroître certaines LAMC(i) : examinant un arc a du réseau, si $\text{LAMC}(B_a) + 1_a \geq \text{LAMC}(E_a)$ alors on définit un nouveau moyen d'accès au noeud qui détermine l'arc, ainsi que de nouvelles possibilités de parcours qu'on intègre dans une liste d'attente qui sert à définir les prochains arcs à examiner.

3. Algorithme de FORD

L'algorithme de Ford s'applique aux réseaux qui ne comportent pas de cycles de longueur négative ; donc certains arcs peuvent présenter des longueurs négatives, mais pas trop...

On définit initialement la liste d'attente comme le sommet d'origine r.

A un instant intermédiaire, on inspecte un noeud i de la liste d'attente : pour tout arc a issu de ce noeud, on teste si $\text{LAMC}(i) + 1_a \geq \text{LAMC}(E_a)$, auquel cas on ajoute E_a à la liste d'attente.

Dans tous les cas le sommet i est retiré de cette liste.

Appelant itération un ensemble d'opérations consistant à appliquer le traitement élémentaire décrit ci-dessus à tous les noeuds présents dans la liste d'attente à un instant

donné, alors, si le réseau n'admet pas de circuit de longueur strictement négative, les valeurs finales des LAMC(i) sont obtenues en au plus $\frac{n}{a} - 1$ itérations.

La description formelle s'énonce ainsi, notant S la liste d'attente :

Pas 1 Initialisations

$LAMC(i) = +\infty \forall i$; $LAMC(r) = 0$; $S = \{r\}$ (r désigne le noeud d'origine)

Pas 2 Etape courante

TANTQUE $S \neq \emptyset$, FAIRE

CHOOSE i dans S;

\forall a successeur regarder de i $LAMC(i) + l_{ia} \leftarrow LAMC(i_a)$

SI $0 < l_{ia}$, FAIRE $S = S \cup \{i_a\}$ et $LAMC(i_a) = LAMC(i) + l_{ia}$, on détecte l'existence des circuits de longueur négative s'il en existe

FAIRE $S = S \setminus \{i\}$

Divers ajouts permettent de stocker d'autres informations que les longueurs minimales d'accès, ou de procéder aisément à la tenue de la liste.

Pour décrire les chemins d'accès, il suffit d'associer à chaque noeud i une variable P(i) contenant l'indice du noeud extrémité initiale de l'arc terminant le meilleur chemin entre r et i. Cette variable doit être mise à jour à chaque fois que i est introduit dans S. La considération successive des P(i), P(P(i)), ... indique l'ordre inverse des sommets sur le chemin de r à i.

Pour gérer la liste d'attente, il suffit d'associer à chaque noeud i une variable S(i) qui vaudra 0 si i ne figure pas dans la liste, ou j indice du successeur de i dans la liste quand i en fait partie (ou -1 si i est en fin de liste).

Deux variables supplémentaires TêteDeListe et FinDeListe visent respectivement les premier et dernier noeuds de la liste. L'ajout d'un sommet i à la liste, en position terminale (s'assurer d'abord que S(i)=0), s'opère en affectant i à S (FinDeListe), puis i à FinDeListe. Pour retirer un élément i du début de la liste, il suffit d'affecter S(TêteDeListe) à TêteDeListe et d'imposer S(i)=0. On sait que la liste est épuisée dès que la réponse à (TêteDeListe)-1? est positive.

4. Algorithme d'affectation routière du modèle (adaptation de l'algorithme de Ford) et procédure d'affectation des déplacements en

transports collectifs

L'intégralité du modèle est mis en oeuvre sous EXCEL. L'algorithme d'affectation routière a été programmé en VISUAL BASIC (VBA Excel 97) sous environnement WINDOWS, ainsi que la procédure d'affectation routière.

L'algorithme tel qu'il a été programmé en VBA Excel 97 est présenté ci-après :

```

Sub Affectation()
'MODULE AFFECTATION
'Déclaration des variables générales
Dim entree As Integer, sortie As Integer, au As Integer
Dim h As Integer, i As Integer, j As Integer, u As Integer, v As Integer
'Déclaration des variables d'affectation VI
'Flux=nombre d'observations
'EspDir(i,j)=temps d'accès direct de i à j
'EspDir(i,j)=temps du plus court chemin connu de i à j (s'il par défaut,
'EspDir(i,j)=équivalent temps des routes montées de compte
'FluxOD(i,j)=flux origine-destination de i à j
'FluxDir(i,j)=flux affectés sur la liaison directe de i à j
'S(i)=1 si la zone i est dans la file d'attente, 0 sinon
'P(i,j,k,s)=de la k-ième zone avant j dans le plus court chemin de i à j
Dim k1 As Integer, k2 As Integer
Dim EspDir(46, 46) As Single, EspDirT(46, 46) As Single, EspDir(46, 46) As Single
Dim EspDirT(25, 25) As Single, EspDirT(46, 46) As Single, EspDirT(46, 46) As Single
Dim FluxOD(45, 45) As Single, FluxDir(45, 46) As Single
Dim S(46) As Integer, P(46, 46, 20) As Integer, ValTps As Single
'Déclaration des variables d'intermédiaire TI
'k1 et k2 = pénalités des temps d'accès et d'attente
'EspDir(i,j)= pénalité de temps d'accès vers la zone s
'EspDir(i,j,s)= temps d'accès de la zone i au node s vers la zone j, multiplié par
'EspDir
'EspDirT(i,j,s)= temps d'attente du node s en zone i vers la zone j, multiplié par
'EspDir
'EspDirT(i,j,s)= temps d'accès direct (en véhicule) de i à j par le node s
'EspDir(i,j)= meilleur temps direct d'origine i à destination j
'EspDirT(i,j)= meilleur temps direct entre points de correspondance i et j
'EspDirT(i,j)= meilleur temps direct entre point de correspondance i et destination j
'EspDirT(i,j)= meilleur temps direct entre point de correspondance i et destination j
'EspDirT(i,j)= meilleur temps entre l'origine i et le point de correspondance
'EspDirT(i,j)= idem en sachant une correspondance supplémentaire
'EspDirT(i,j)= meilleur temps d'origine i à destination j
Dim k1 As Single, k2 As Single, TpsDir(46) As Single
Dim TpsDir(25, 25, 3) As Single, TpsDir(25, 25, 3) As Single, TpsDirT(25, 25, 3) As Single
Dim FAVT(25, 25, 3) As Single, FAVu(25, 25, 3) As Single
Dim CAVT(25, 25, 3) As Single, CAVu(25, 25, 3) As Single
Dim FAVh(25, 25) As Single, FAV(25, 25) As Single
Dim CAVT(25, 25) As Single, CAV(25, 25) As Single
Dim TpsInt(25, 25) As Single, TpsIntT(25, 25) As Single, TpsPcT(25, 25) As Single

```

```

'Localisation
andep = Sheets("Paramètres").Range("A2").Value
andfin = Application.Max(Sheets("Paramètres").Range("L2").Value, andep + 1)
Worksheets("Résultats").Range("A1:A145").ClearContents
'220 A 220
For an = andep + 1 To andfin
Worksheets("Paramètres").Range("A2").Value = an
Application.ScreenUpdating = False
Columnsort
If an < andfin Then
'AFFECTATION ACTIVÉE -----
'
NbUtil = 5
'Le nombre des entrées en installation
'Le nombre de la valeur du temps
Worksheets("Paramètres").Select
Range("L2").Select
VallTps = ActiveCell.Value
'Le nombre de la distance des distances et des capacités de localisation des valeurs
des capacités, vitesse à vide, et temps
Worksheets("Paramètres Oline continue").Select
Range("A2").Select
For i = 1 To 40
For j = 1 To 40
If i = 1 Then
If j = 1 Then ActiveCell.Offset(100 - 1, 1).Value = 1
If ActiveCell.Offset(1, j).Value = "" Then
If ActiveCell.Offset(30 + 1, j).Value = "" Then
Capac(i, j) = 0
Vavide(i, j) = 0
TpsPia(i, j) = 999
Else
Capac(i, j) = ActiveCell.Offset(1, j).Value
Vavide(i, j) = ActiveCell.Offset(150 - 1, 1).Value
TpsPia(i, j) = ActiveCell.Offset(150 + 1, j).Value / VallTps
TpsDia(i, j) = Dist(i, j) / Vavide(i, j) + TpsPia(i, j)
End If
Else
If i = 1 Then ActiveCell.Offset(200 - 1, 1).Value = 0
If i = 1 Then TpsPia(i, j) = 999
If i = 1 Then Vavide(i, j) = 0
Else
TpsPia(i, j) = 0
End If
End If
Next j
Next i
End Sub

```

```

'Algorithme de recherche du plus court chemin
For n = 1 To NbrIter
'Exploration des itinéraires
  For i = 1 To 40
    S(i) = 1
    Do
      For j = 1 To 40
        If S(j) = 1 Then
          For k = 1 To 40
            If TpsPar(i, j) + TpsDir(j, k) < TpsPar(i, k) Then
              TpsPar(i, k) = TpsPar(i, j) + TpsDir(j, k)
              S(k) = 1
              P(i, k, 1) = j
            End If
          Next k
        Next j
      End If
      Next i
      S(i) = 0
      For i = 1 To 40
        Stat = Stat + S(i)
      Next i
      Loop Until Stat = 0
      TpsPar(1, 1) = TpsDir(1, 1)
      Next i
'Attribution aux plus courts chemins
  For i = 1 To 40
    For j = 1 To 40
      FluxAll(P(i, j, 0)) = FluxAll(P(i, j, 1)) + F(i, j, 0) +
FluxOD(i, j) / NbIter
      For k = 2 To 10
        P(i, j, k) = P(i, j, k - 1)
        FluxAll(P(i, j, k)) = FluxAll(P(i, j, k - 1)) +
FluxOD(i, j) / NbIter
      Next k
      Next j
      FluxAll(i, i) = FluxAll(i, 1) + FluxOD(i, i) / NbIter
    Next i
  Next n

'Calcul des nouvelles vitesses et reinitialisation
For i = 1 To 40
  For j = 1 To 40
    If Capa(i, j) = 0 Then
      TpsDir(i, j) = 999
    Else
      Select Case FluxAll(i, j) / Capa(i, j)
        Case Is < 0,5
          c = 1
        Case Is < 1
          c = 1.8 - 1.6 * (FluxAll(i, j) / Capa(i, j))
        Case Else
          c = 0.2
        End Select
      TpsDir(i, j) = (TpsDir(i, j) / c) + TpsDir(i, j)
    End If
    TpsPar(i, i) = 999
    P(i, j, 0) = i
    Next j
    TpsPar(i, i) = 0
    S(i) = 1
    Next i
  Next n

```

```

'Calcul des temps de routages et écriture des résultats
Sheets("Céfre routière").Select
Range("B53:AU58").ClearContents
Range("B113:AU128").ClearContents
Range("D250:AU265").ClearContents
Range("K2").Select
For i = 1 To 46
    S(i) = 1
    Do
        For j = 1 To 46
            If S(j) = 1 Then
                For k = 1 To 46
                    If TpsPec(i, j) + TpsDir(j, k) <
TpsPec(i, k) Then
                        TpsPec(i, k) = TpsPec(i, j) +
TpsDir(j, k)
                    End If
                Next k
                S(j) = 0
            End If
        Next j
        Stoc = 0
        For i = 1 To 46
            S(i) = S(i) - S(i)
        Next i
        Loop Until Stoc = 0
        TpsPec(1, 1) = TpsDir(1, 1)
        For j = 1 To 46
            If C-pe(i, j) <> 0 Then
                ActiveCell.Offset(61 + i, j).Value = Fluat(i,
j)
                ActiveCell.Offset(100 + i, j).Value = (TpsDir(i,
j) * TpsPec(i, j)) * 60
            End If
            ActiveCell.Offset(287 + i, j).Value = TpsPec(i, j) * 60
        Next j
    Next i
Sheets("Céfre routière").Range("D2:AU40").Calculate
Sheets("Céfre routière").Range("B152:AU193").Calculate
Sheets("Céfre routière").Range("B202:Z227").Calculate
Sheets("Céfre multi-é").Range("B232:Z256").Calculate
Sheets("Céfre routière").Range("B250:Z285").Calculate
'FIN PROCEDURE AFFECTATION VT

```

"Cyberthèses ou Plateforme" - © Celui de l'auteur ou l'autre	535
--	-----

