

**INTERACTIONS ENTRE SYSTEME DE TRANSPORT ET
SYSTEME DE LOCALISATION :
DE L'HERITAGE DES MODELES TRADITIONNELS
A L'APPORT DES MODELES INTERACTIFS
DE TRANSPORT ET D'OCCUPATION DES SOLS**

SOPHIE MASSON

LABORATOIRE D'ECONOMIE DES TRANSPORTS
UNIVERSITE LUMIERE LYON 2, ENTPE, CNRS

1. INTRODUCTION

Depuis les années 70, 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, l'éclatement géographique de la distribution des déplacements. 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 d'étalement urbain a été, à l'origine, encouragé et aujourd'hui entretenu par l'accroissement des facilités de transport à destination des zones périphériques (en raison de la diffusion de l'automobile, au développement

de projets d'investissements routiers...). Il apparaît ainsi que les formes de la croissance urbaine ont des incidences sur l'évolution des systèmes de déplacements, et vice versa. Il semble alors important d'inclure les interactions entre le système de transport et le système d'occupation des sols lorsque l'on évalue les politiques de transport. Les modèles de prévision de la demande de transport doivent tenir compte de ces effets.

Devant le manque d'efficacité des politiques de transport et l'émergence de la problématique du "développement durable des villes", la nécessité d'orienter les procédures de planification vers une approche stratégique de long terme ainsi que le besoin de nouveaux outils de modélisation de la demande de transport se sont petit à petit imposés. Les modèles de prévision de la demande de déplacements ont été remis en cause du fait de leur incapacité à rendre compte des effets à long terme des politiques de transport (qui peuvent être très différents des réponses à court terme) et des rétroactions entre système de transport et système d'occupation des sols. Ce contexte rend d'actualité les modèles interactifs de transport et d'occupation des sols.

Dans une première partie, nous rappellerons les tendances lourdes de l'évolution du système de déplacements urbains, puis exposerons une revue de l'évolution de la modélisation de la demande de déplacements en parallèle avec celle du contexte de planification des transports urbains. Cela nous amènera à considérer une nouvelle orientation des modèles qui se fait jour dans un contexte de planification privilégiant l'approche stratégique et systémique de long terme, donnant une place majeure aux modèles stratégiques de déplacements et aux modèles interactifs de transport et d'occupation des sols.

Dans une deuxième partie, après avoir rappelé comment les modèles urbains rendent compte des relations existant entre les transports et l'occupation des sols, nous présenterons les grands principes des modèles interactifs ainsi que leurs apports et leurs limites. Une évaluation en sera, par la suite, proposée.

2. L'EVOLUTION DE LA METHODOLOGIE DE L'ANALYSE ET DE LA PREVISION DE LA DEMANDE DE TRANSPORT EN MILIEU URBAIN

2.1. CARACTERISTIQUES ET EVOLUTION DES TRANSPORTS EN MILIEU URBAIN

Depuis le début des années 70, dans la plupart des grandes agglomérations, les déplacements urbains de personnes se caractérisent par un équilibre fragile que certains auteurs ont qualifié de double crise de financement et de

congestion¹. Les tendances lourdes de l'évolution des déplacements urbains sont la progression de la mobilité quotidienne et la croissance conjointe des taux de motorisation des ménages. Cette mobilité se porte sur la voiture particulière, aux dépens des transports collectifs, à mesure qu'augmente le nombre de voitures disponibles dans le ménage. Ce phénomène s'explique par la progression de la richesse nationale, la baisse générale des coûts réels d'utilisation d'une voiture et l'apparition de styles de vie dépendants toujours plus de l'automobile.

Un autre trait marquant de l'évolution de la structure des déplacements est la tendance à l'allongement des distances parcourues, essentiellement en automobile. Cette augmentation des distances parcourues est portée par l'évolution des localisations résidentielles vers des espaces périurbains moins denses et plus éloignés du centre, mais aussi par le transfert d'emplois, de commerces et de services vers des zones périphériques. Ce mouvement, dit de périurbanisation, ne se manifeste pas uniquement par un phénomène de concrétion aux franges - l'espace urbain gagne sur les espaces ruraux - mais également par une recomposition interne des espaces, et conduit à une dissociation croissante des lieux d'habitation et de travail (TABOURIN *et al.*, 1995). Cette déformation des formes urbaines a été à l'origine encouragée par la diffusion de l'automobile (qui a offert à un public toujours plus vaste la possibilité de se rendre n'importe où et n'importe quand), et la réalisation de nombreux projets routiers (les rocade de contournements sont bientôt devenus l'élément structurant de cette nouvelle organisation des activités). En retour, ce mouvement a un effet non négligeable sur la configuration géographique des déplacements et sur le choix du mode de transport. En partie responsable de la croissance des trafics aux portes des grandes agglomérations, cette nouvelle configuration urbaine favorise l'usage de la voiture particulière. 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 y sont peu présents ou de qualité médiocre, ceux-ci n'étant efficaces que lorsqu'il est possible de rassembler les usagers et de les transporter en groupe jusqu'à une destination commune. L'abaissement des densités urbaines 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 déplacement.

¹ Une crise de congestion avec la forte montée de la circulation automobile, et une crise de financement expliquée d'une part par la perte d'attractivité des transports en commun, fortement concurrencés par la voiture particulière, et d'autre part, par le poids des investissements lourds en transports collectifs réalisés dans les années 70 afin d'enrayer la perte de vitesse des transports publics. Cela se traduit par un système de transports publics de plus en plus déficitaire.

Ces évolutions ne sont pas sans un certain coût pour la collectivité. Ainsi, presque toutes les grandes agglomérations souffrent d'encombrement dans les quartiers centraux durant une bonne partie de la journée, ainsi que le long des artères aux heures de pointe. La desserte des zones périurbaines en transports collectifs est difficile et onéreuse. Les préoccupations portent sur le coût élevé des pertes de temps, des accidents et la consommation d'énergie ; les dommages causés à l'environnement (bruit, pollution, dégradation du paysage, etc.) ; la baisse de fréquentation des transports collectifs de plus en plus déficitaires. Ces différentes évolutions des transports urbains et les effets engendrés ont fait prendre conscience de la nécessité de mieux maîtriser l'espace urbain et son usage. Le manque d'efficacité des politiques de transports menées jusqu'alors ainsi que l'émergence de la problématique du « développement durable », ou du moins maîtrisé, des villes, ont mis en évidence la nécessité d'un renouvellement de la planification à long terme, et donc le besoin de nouveaux outils d'aide à la planification.

Ainsi, cette nouvelle inscription de la planification des transports urbains a remis en question la pertinence et l'efficacité des modèles de prévision de la demande de transport jusqu'ici employés. Avant de présenter vers quels types d'outils ces nouvelles réflexions ont conduit depuis les années 80, nous proposons de faire un retour critique sur l'évolution des modèles d'analyse de la demande de transports urbains. L'évolution de ces modèles peut être considérée, d'une certaine façon, comme le résultat de la volonté d'adaptation aux questions posées et aux objectifs à atteindre par la planification des transports urbains.

La planification des systèmes de transport est depuis longtemps considérée comme nécessaire afin de réguler les dysfonctionnements du système de déplacements. Le caractère indispensable d'une approche modélisée de la prévision de la demande de transport s'est fait très tôt ressentir notamment aux Etats-Unis dans les années 30 et 40, mais ce n'est qu'au début des années 50 que la prévision des transports urbains connaît un véritable essor et aboutit à une méthode de prévision généralisée : la « méthode classique » des modèles à quatre étapes².

2.2. LA METHODOLOGIE CLASSIQUE DES MODELES A QUATRE ETAPES

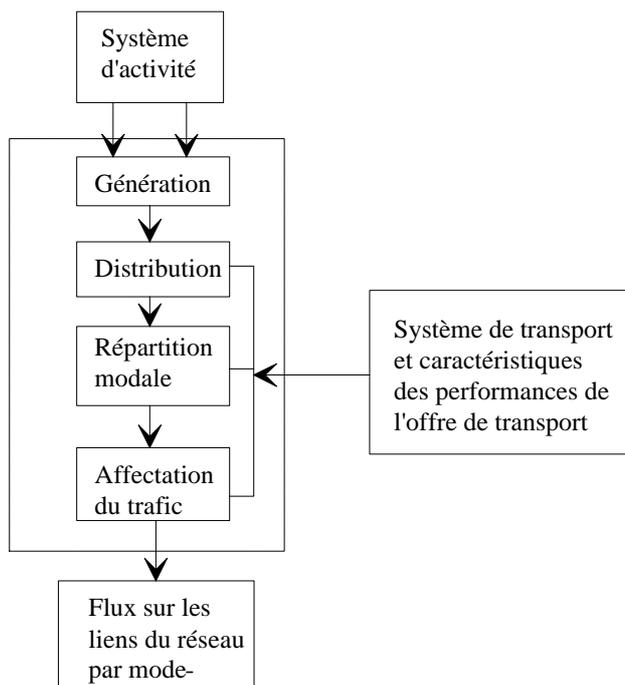
2.2.1. Principes de la "méthode classique"

La "méthode classique" a été mise au point, dans ses grandes lignes, entre 1960 et 1965. Ces modèles ont été développés pour fournir des outils

² Cette méthode de prévision généralisée fait l'objet d'une proclamation officielle en 1956 par le *Federal and Highway Act* (LE NIR, 1991).

d'analyse du système de transport en Amérique du Nord. Le principal objectif était de planifier les investissements de transport nécessaires aux régions urbaines afin de faire face à la croissance d'après guerre. Ces modèles sont utilisés afin de prévoir le nombre de déplacements effectués dans une aire urbaine donnée par motif selon la période du jour et le couple origine-destination considéré, le mode de transport utilisé et les itinéraires empruntés sur le réseau par ces trafics. Le résultat final de ce modèle est la production d'un ensemble de flux modaux sur les liens d'un réseau. Les principaux inputs sont les paramètres d'occupation des sols générant ces flux et les caractéristiques du système de transport qui sert de support à ces flux. Le modèle correspond en un processus séquentiel qui projette dans un premier temps les masses de déplacements en émission et en réception de chaque zone (génération), distribue spatialement ces déplacements selon une origine et une destination données (distribution), répartit cette matrice de flux par mode (répartition modale) et affecte ces flux modaux sur un réseau (affectation) (Figure 1). Ces modèles ne tendent cependant pas vers des représentations des comportements décisionnels de déplacements, mais plutôt vers une approche pragmatique qui réduit de façon extrême le phénomène complexe des comportements de déplacements dans des composants analytiques maniables et qui peuvent être traités avec des techniques relativement simples.

Figure 2 : Structure générale des modèles à quatre étapes



2.2.2. Les critiques de la méthode classique

"La période d'or de la méthode classique fut les années 60, époque des certitudes" (MERLIN, 1984). Dès la fin de cette décennie et pendant toute la suivante, les critiques se multiplient. En outre, avec le déclin des études de planification à long terme pendant les années soixante-dix, provoqué par des contraintes de rareté de ressources publiques, les modèles à quatre étapes ont décliné en importance et en usage. Ils étaient jugés trop onéreux pour des études courantes, trop nécessitant de données et trop agrégés pour des études précises, de façon générale trop lourds à l'usage et pas assez flexibles. Certaines critiques particulières, adressées à ces modèles, peuvent être rapidement reprises. Une première critique dénonce la méthode classique comme étant « une technique de planification au service de l'automobile » (DUPUY, 1975). Cette critique est justifiée par le fait que ces modèles ont été introduits dans un contexte particulièrement favorable à l'industrie automobile, et correspondaient à une problématique d'investissements routiers massifs. Dans ces modèles, les autres modes de transport, dont la décroissance devait inéluctablement se poursuivre, n'étaient traités que comme des résidus. En outre, ces modèles n'ont généralement pas été employés de façon itérative, il en ressort que les données exogènes ont influencé considérablement les résultats. Or, dans le contexte de croissance de la mobilité motorisée, et celui du développement urbain (souvent avec extension spatiale importante), ces modèles calculent des prévisions qui conduisent à un réseau assurant à long terme un développement de la circulation automobile. On peut remarquer cependant, que les critiques de DUPUY visent en fait plus la manière dont les modèles ont été utilisés, notamment en France, que la méthode classique elle-même. Ces modèles sont également accusés d'être conservateurs. Faute de disposer de séries temporelles, en tout cas de séries longues, les modélisateurs ont souvent recours, pour ajuster les modèles, à des coupes instantanées. Cela néglige la dérive des comportements dont MERLIN (1984) estime "qu'elle met en question la validité des simulations effectuées à moyen et long termes". Les modèles classiques opèrent à partir de données agrégées. La représentation des comportements moyens qui en découle tend à masquer la grande hétérogénéité des attitudes des ménages ou des individus face aux déplacements. Ces modèles ne sont pas fondés sur une théorie cohérente des comportements de déplacements (DOMENCICH, MCFADDEN, 1975). Ces modèles peuvent être qualifiés de modèles unidirectionnels dans lesquels chaque étape n'influe pas sur les suivantes. Les effets rétroactifs sont fréquemment négligés. Pourtant, les résultats finaux des modèles, tel que le degré de congestion de la voirie, peuvent avoir des impacts importants sur les trois premières étapes : effet de la congestion sur les localisations résidentielles ou professionnelles des ménages, remise en cause du niveau de

mobilité ou des choix modaux. La modélisation de ces interactions est théoriquement possible, mais en pratique, il s'agit d'une opération difficile et lourde³.

Au total, ces modèles, construits pour produire des projections de long terme, se révèlent incapables, de par leur nature statique et l'utilisation qui en a été faite, d'atteindre correctement leurs objectifs. Dans l'objectif de réduire les déficiences de cette modélisation, il est apparu nécessaire de dépasser les difficultés que pose la méthode classique. Deux voies de recherche se sont développées. La première s'est attachée à pallier le manque de prise en compte des comportements individuels et a débouché sur le développement de la méthode des modèles désagrégés. La deuxième, dans une toute autre optique, s'est efforcée de dépasser le caractère unidirectionnel et statique des modèles à quatre étapes et de prendre en compte les interactions. C'est la voie suivie par les modèles stratégiques de déplacements urbains et celle des modèles interactifs de transport et de localisation.

La première rupture dans la méthodologie de la prévision de la demande de transport s'est réalisée dans les années 70. Cette rupture s'explique d'une part par un retour de la planification de plus court terme provoqué par des contraintes de rareté des ressources, et d'autre part par une nécessité d'adopter une approche explicitement plus comportementale pour la conceptualisation et la modélisation de la demande de transport. Un courant majeur d'activités de la recherche a émergé à cette période, se focalisant 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 : les modèles désagrégés.

2.3. LA RUPTURE DES ANNEES SOIXANTE-DIX : VERS LA METHODE DES MODELES DESAGREGES

2.3.1. Les principes des modèles désagrégés

De façon générale, l'analyse de la demande de transport s'inscrit dans le paradigme économique néoclassique. Les usagers du transport sont supposés être des individus rationnels cherchant à maximiser leur utilité. Si l'approche

³ En fait, la méthode classique est, théoriquement du moins, une méthode itérative. Les attributs des réseaux déterminés à l'issue d'une première application du modèle peuvent être réintroduits dans les modèles de distribution ou de choix modal, ou encore dans un modèle de développement urbain afin de simuler la répartition future des populations et des activités. En effet, à partir de celles-ci, on peut prévoir à nouveau les déplacements engendrés, leur distribution géographique. En pratique, ce processus itératif est souvent simplifié ou négligé.

conventionnelle à quatre étapes a souvent été accusée de n'être pas comportementale, il n'en demeure pas moins qu'elle se fonde sur les hypothèses de l'*homo oeconomicus* maximisateur d'utilité. En revanche, elle ne s'intéresse pas directement à l'individu mais à la demande globale de transport, ce qui revient à supposer que l'ensemble des individus (la demande de marché) se comporte globalement comme un individu représentatif moyen.

Les modèles dits désagrégés fondent leur analyse au niveau de l'individu. Dans ces modèles, l'individu est appelé à effectuer un choix et supposé confronté à un ensemble d'alternatives. L'économie néoclassique suppose que l'individu dispose d'une fonction d'utilité qui lui permet de ranger les différentes alternatives de manière cohérente et non ambiguë et qu'il choisit ensuite l'alternative qui maximise son utilité. Le processus de choix est donc déterministe. Les psychologues dénoncent cette vision et affirment, au contraire, que les choix sont presque toujours appréhendés de façon probabiliste. L'approche des économètres est conceptuellement différente (BEN-AKIVA, LERMAN, 1979). Chaque individu est supposé avoir une fonction d'utilité déterministe. 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 d'utilité. On décompose alors cette fonction en deux parties : d'une part, un élément déterministe représentant la partie connue de l'utilité et qui est définie sur les caractéristiques observables des actions, et d'autre part, un élément aléatoire qui représente la différence entre la fonction d'utilité et l'élément déterministe. L'incertitude trouve son origine dans le manque d'informations du modélisateur (DE PALMA, THISSE, 1987).

La prise en considération de fonctions d'utilités aléatoires amène à employer des modèles de choix probabilistes. Le problème qui se pose par conséquent 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 (DE PALMA, THISSE, 1987). La distribution des erreurs contenues dans la fonction d'utilité détermine la forme de la fonction de probabilité relative au choix d'une alternative. Les modèles de choix discrets appliqués à la modélisation dans le transport urbain sont spécifiés sous des formes diverses : logit, logit emboîté, probit. Cependant, c'est le modèle logit qui demeure le plus courant. Il spécifie une distribution identique et indépendante des aléas selon la loi de WEIBULL. Cette propriété permet d'introduire la notion de séparabilité des choix. En effet, le problème du choix du consommateur en matière de déplacement peut s'énoncer ainsi : choisir des activités et des

déplacements liés de manière à maximiser l'utilité globale en résultant. Le modèle idéal consisterait donc à identifier les alternatives constituées par les différentes combinaisons d'activités et de déplacements et à déterminer les niveaux d'utilité correspondants. Le nombre des combinaisons possibles rend vite ce problème insoluble (RAUX, 1983). La propriété de la distribution identique et indépendante des aléas permet de dépasser ce problème en justifiant théoriquement la décomposition du choix global en une suite de choix élémentaires. Cette formulation consiste à adopter une structure récursive.

Cette méthodologie conduit à des progrès remarquables de l'analyse et la prévision de la demande de transport. Cependant, elle n'est pas exempte de critiques diverses.

2.3.2. *Les limites des modèles désagrégés*

La critique de ces modèles désagrégés peut se faire selon la grille de lecture méthodologique des performances d'un modèle proposée par BONNAFOUS⁴ (1972) pour lequel l'opérationnalité scientifique d'un modèle se fonde sur trois exigences : la pertinence, la cohérence et la mesurabilité.

Au départ, ces modèles sont à la recherche d'une plus grande pertinence qui consiste à admettre l'interdépendance des étapes de choix entre elles. Cela se heurte à un problème de mesurabilité qui nécessite une certaine indépendance des étapes entre elles. La structure des modèles désagrégés, qui s'appuie sur une structure récursive autorisée par la propriété d'indépendances des alternatives, peut alors être comprise comme un compromis entre cette exigence de pertinence et celle de mesurabilité. Ainsi, si la cohérence interne de ces modèles semble être bien respectée, on ne peut pas en dire autant de leur cohérence vis-à-vis des objectifs théoriques (LE NIR, 1991).

Les modèles désagrégés peuvent également être jugés sur le degré de pertinence. Leur construction théorique cohérente est bâtie sur une formalisation mathématique qui nécessite un certain nombre d'hypothèses

⁴ Selon la définition de BONNAFOUS (1972), l'opérationnalité d'un modèle est définie par trois conditions nécessaires et suffisantes de cohérence, pertinence et mesurabilité. La cohérence comprend non seulement la cohérence interne du discours logique ou mathématique mais aussi la cohérence par rapport aux objectifs du modèle, c'est-à-dire la compatibilité entre la structure du modèle et ses ambitions. La pertinence signifie la conformité du système formel avec le système réel tel qu'il représente la réalité. La mesurabilité signifie que variables et paramètres doivent pouvoir être estimés à partir d'échantillons statistiques accessibles. BONNAFOUS montre que ces trois conditions sont contradictoires : l'amélioration de l'une d'elles entrant nécessairement en conflit avec les deux autres.

simplificatrices. En particulier l'hypothèse la plus critiquée est celle de l'indépendance entre les alternatives posée par l'utilisation du modèle logit. 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 donné d'alternatives modifiera les parts absolues de marché, mais laissera 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 du métro par exemple, aura tendance à enlever une part de marché plus importante aux autres modes collectifs plutôt qu'à la voiture particulière (RAUX, 1983). Cette contradiction a été soulignée par DEBREU en 1960 qui a montré que l'hypothèse de séparabilité pouvait conduire à des résultats contre-intuitifs et est plus largement connue sous le nom « *blue bus / red bus paradox* ». Cette difficulté a été, cependant, dépassée par une proposition de BEN-AKIVA consistant à modéliser le processus de choix selon une procédure emboîtée à deux (ou plusieurs) étapes. En outre, une critique peut être formulée sur le fait que 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.

Enfin, les modèles désagrégés, de façon générale, sont confrontés à la difficulté de la réagrégation des données (ces modèles travaillent sur des segments homogènes de la demande).

En dépit de certains problèmes, les modèles désagrégés sont capables de répondre à de nombreuses préoccupations des responsables des transports urbains. Ces modèles s'adressent plus particulièrement aux gestionnaires des systèmes de transport afin de tester des politiques de régulation à court ou moyen terme de la congestion. Récemment, DE PALMA (DE PALMA *et al.*, 1996) a développé un outil de modélisation dynamique (METROPOLIS) permettant de déterminer au mieux l'impact des mesures visant à réduire la congestion. Cet outil 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.

Si ces modèles d'analyse des impacts de politiques dans des perspectives de court ou moyen terme sont fortement utiles aux gestionnaires de réseau, il n'en demeure pas moins qu'une approche plus globale et à plus long terme s'est rapidement révélée indispensable et la nécessité d'une dimension stratégique de la planification urbaine est devenue à partir des années 80 le leitmotiv des responsables de la planification. Cette dernière va alors encourager le développement des modèles stratégiques de déplacements urbains et les 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 statique et conservateur, en intégrant la prise en compte des interactions du système de transport.

2.4. L'ORIENTATION VERS UNE PLANIFICATION STRATEGIQUE ET LA RECHERCHE DE NOUVEAUX OUTILS DE MODELISATION

2.4.1. L'émergence de la planification stratégique

L'évolution du système des déplacements urbains, la prise de conscience des dangers de la poursuite des tendances passées et le constat d'échec des politiques 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, s'est peu à peu imposée⁵.

Le rapport de la CEMT de 1985 (WEBSTER, 1985) fait ressortir que « *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 transports 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* ». 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. Par ailleurs, WIEL (1994) souligne que c'est l'excès d'autonomie de la planification des déplacements et celle de l'urbanisme, la cause de l'échec des politiques urbaines à long terme. Afin de définir des mesures d'intervention pertinentes, il faut se donner les moyens d'en évaluer les effets à long terme et d'intégrer les rétroactions potentielles entre le système de transport et le système d'occupation des sols. Il faut prendre en compte le caractère dynamique du développement urbain et le fait que les individus et les activités disposent d'une certaine capacité d'adaptation aux changements.

⁵ Ce souci s'est traduit en France par l'élaboration de Dossier de Voirie d'Agglomération dans plusieurs grandes villes françaises et par l'expression de certains comités techniques du besoin de disposer d'outils adéquats de simulation de stratégies de développement du système de transport à long terme.

Cette orientation des stratégies de planification repose sur une vision globalisante du système urbain et rejoint l'analyse de BONNAFOUS et PUEL (1983) pour qui l'évolution des déplacements urbains prend sa source dans les éléments propres du secteur des transports, mais aussi dans les modes de vie et dans les formes urbaines. Le problème des transports urbains doit être considéré comme un tout. Cette nouvelle inscription de la planification des transports urbains nécessite l'élaboration d'outils de modélisation qui doivent être capables de simuler à l'échelle d'une agglomération les conséquences de politiques variées de transport en tenant compte des répercussions éventuelles sur le développement urbain dans une perspective de long terme.

Les outils de modélisation construits afin de venir en aide à cette planification stratégique sont les modèles dits stratégiques de déplacements et les modèles interactifs de transports et d'occupation des sols.

2.4.2. Les modèles stratégiques de demande de transports urbains

Les 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). Plus récemment, une modélisation stratégique a été entreprise sur l'agglomération lyonnaise (MASSON, 1995 ; RAUX *et al.*, 1996). Son intérêt est la possibilité de modéliser les rétroactions dans le système de transport. Ils tentent de rendre compte des réactions des usagers suite à des variations des conditions de transport : modification du choix de l'itinéraire, du choix du mode ou de celui de la destination du déplacement.

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 ont pour principe de fonctionner avec un nombre réduit de zones, une prise en compte de l'ensemble du système de transport, c'est-à-dire les modes privés et les modes publics et les interactions entre ces modes, une représentation de l'offre de transport non pas sous la forme traditionnelle d'un réseau mais par des relations flux-vitesse entre zones, et enfin la prise en compte des rétroactions de l'état de l'offre (congestion) sur la demande.

2.4.3. Les modèles interactifs de transport et localisation

Toujours 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 de localisation s'est développé dont la principale originalité est 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 le requiem de LEE, ces modèles se sont perfectionnés et ont pris une importance grandissante dans les processus de planification à l'étranger. Aujourd'hui, 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.

Les modèles interactifs de transport et d'occupation des sols se fondent sur la mise en relation de deux disciplines : l'économie des transports et l'économie urbaine. Avant de présenter les grands principes de ces modèles, nous rappelons de quelle façon les modèles urbains rendent compte de la relation entre transport et occupation des sols.

3. LES MODELES INTERACTIFS DE TRANSPORT ET D'OCCUPATION DES SOLS : PRINCIPES, APPORTS ET LIMITES

3.1. LA NECESSAIRE PRISE EN COMPTE DES INTERACTIONS ENTRE TRANSPORT ET OCCUPATION DES SOLS

L'influence du développement urbain sur l'évolution de la mobilité est un processus largement admis. Depuis les années 60, les plans de transports 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 transports 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 des incidences sur les déplacements et l'offre de transport, lesquels affectent à leur tour la façon dont les villes évoluent. La demande de déplacement est une demande dérivée, intermédiaire. L'espace crée une séparation spatiale entre les agents

qui désirent interagir en vue d'accroître leur utilité. L'interaction spatiale se réalise via le réseau de transport. Les besoins de déplacements naissent ainsi des besoins d'échanges. Il existe des liens étroits entre la structure du système de transport et l'organisation géographique de l'espace concerné par les interactions. Si les structures urbaines viennent à changer (c'est le cas avec le mouvement de périurbanisation), la demande de déplacement s'en trouve modifiée. En retour, dans la mesure où les décisions de localisation des acteurs urbains sont en partie déterminées par les coûts relatifs de transport, des conditions de transport peuvent avoir à long terme des effets sur la structure des localisations des individus. Si l'influence des structures urbaines sur la demande de déplacements est largement acceptée et modélisée, en revanche, l'influence des transports sur la localisation des individus et des activités et plus généralement sur les formes urbaines n'est pas totalement reconnue. Si l'on reconnaît son rôle non négligeable sur l'évolution historique des formes urbaines⁶, cette action ne présente pas un caractère automatique et univoque et ne peut s'observer que sur un horizon de long terme. Cependant, certains auteurs, comme WIEL, soulignent que *"c'est la gestion des déplacements qui induit l'évolution urbaine beaucoup plus que l'inverse, bien sûr en interférence avec une multiplicité d'autres évolutions. Le moteur de la transformation de la ville n'est plus ou n'est plus seulement la croissance démographique mais la mobilité"* (WIEL, 1994).

Il ressort que l'évolution future des déplacements doit être envisagée en considérant les tendances lourdes socio-économiques 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 localisation⁷.

Ces modèles puisent à la fois dans les modèles de prévision de la demande de transport et dans les différentes traditions de modélisation du développement urbain : les modèles de la microéconomie urbaine et les modèles d'interaction spatiale qui s'appuient sur des analogies aux sciences physiques. A ce titre, les principes de ces modèles peuvent être rappelés en

⁶ Voir les travaux de BAUER et ROUX (1976) qui expliquent comment l'évolution des formes urbaines depuis le dix-neuvième siècle peut être mis en rapport avec l'évolution des technologies et des pratiques de transport.

⁷ Ces modèles sont également nommés "modèles intégrés de transport et d'occupation des sols". Nous emploierons ces deux dénominations de façon indifférente.

insistant particulièrement sur la façon dont ils rendent compte de la relation entre les transports et les mécanismes d'occupation des sols.

3.2. DE LA PRISE EN COMPTE DE LA RELATION ENTRE TRANSPORT ET OCCUPATION DES SOLS DANS LES MODELES URBAINS

3.2.1. L'approche de la microéconomie urbaine

Les travaux fondateurs de ce champ, c'est-à-dire les contributions de VON THÜNEN (1826), WINGO (1961), ALONSO (1964), et par la suite le courant de la Nouvelle Economie Urbaine, essayent de comprendre le fonctionnement d'une ville à partir d'une approche analytique.

Les modèles de la NEU se préoccupent en particulier des comportements des ménages en termes de choix de localisation résidentielle et de formation des prix fonciers. Les hypothèses générales posent que la ville est circulaire, monocentrique et implantée sur une plaine isotrope, les emplois sont regroupés au centre (*Central Business District*). La distance au centre est la seule variable de différenciation des sols. Elle est analysée en termes de coût de transport. Cette conception de la distance, freins aux déplacements, confère aux transports un rôle majeur. Les ménages ne se déplacent que radialement de leur lieu de résidence vers leur lieu de travail (le centre), et un seul mode de transport est considéré. Les ménages se localisent de façon à maximiser leur niveau d'utilité sous contrainte de budget spatialisé (par l'incorporation du prix du sol et des coûts de transport, fonctions explicites de la distance). Les coûts de transport du ménage sont l'élément central de son arbitrage entre sa position dans l'espace et la valeur du sol qu'il est prêt à payer. ALONSO (1964) décrit un processus d'enchères. Les enchères, qualifiées d'enchères de localisation dans la mesure où ce qui est convoité n'est pas le sol en lui-même mais sa distance au centre, reflètent l'arbitrage du ménage entre le niveau d'utilité et le prix du sol qu'il est prêt à payer (ce prix est fonction de la distance au centre et du type de logement). L'augmentation des coûts de transport entraîne une baisse des revenus nets dans 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 s'accroît et la taille de la ville se réduit. Inversement, lorsque le coût de transport s'abaisse cela a pour effet opposé de rendre le profil de rente plus aplati et d'augmenter la taille de la ville (GANNON, 1992). Ainsi, une amélioration des transports abaisse les valeurs foncières au centre tout en les augmentant à la périphérie, ce qui a pour effet d'ouvrir de nouveaux terrains à l'urbanisation et d'étendre le tissu urbain. De même, WINGO (1961) donne une position centrale au rôle des transports dans son ouvrage *"Transportation and urban*

land". Il suppose que le marché des valeurs foncières est conditionné par les transports urbains. Son modèle a l'intérêt de prendre en considération un coût généralisé de transport (et non plus simplement un coût de transport fonction linéaire de la distance au centre), ensemble des dépenses monétaires de transport et de la valeur attribuée au temps de trajet. Son modèle aboutit à établir qu'une amélioration du réseau de transport se traduit par une diminution des valeurs foncières et des densités résidentielles et par une extension des limites de la ville. Il établit ainsi le lien entre transport et croissance urbaine.

Devant le caractère réducteur des hypothèses des modèles élémentaires de la NEU concernant la représentation du système de transport (système radial, monomodal, homogénéité des coûts de transport), divers auteurs ont tenté d'améliorer le modèle initial en levant certaines hypothèses. Un des premiers à avoir davantage pris en compte les transports est MILLS (1967) en introduisant dans son modèle le secteur des transports en tant que secteur de production. KRAUSS (1974) conserve l'hypothèse d'un seul mode de transport mais complète le système radial par un nouveau réseau routier circulaire. De son côté, CAPOZZA (1973 ; 1976) distingue deux modes de transport qui se différencient selon la combinaison des facteurs capital et sol qu'ils incorporent. D'un côté, le métro se caractérise par une technologie capitaliste, économisant le facteur terre ; de l'autre, la route utilise le facteur terre de manière intensive mais économise le facteur capital. Etant donné les prix relatifs des facteurs, le métro doit être construit près du centre urbain et combiné au réseau routier. En dehors de cette zone intérieure, seul le réseau routier se maintient.

D'autres modèles visent à introduire la congestion⁸. Dans les premiers modèles intégrant la congestion, on suppose que le degré de congestion diminue au fur et à mesure que l'on s'éloigne du centre. Cela induit une augmentation du coût de transport plus forte près du centre d'emplois où la congestion du trafic est importante et moins fortement à la périphérie où l'encombrement est négligeable. Etant donné la relation de complémentarité entre la rente foncière et les coûts du transport, on peut dire que la situation de rente diminue plus fortement près du centre et moins fortement à la périphérie du fait de la congestion (BONIVER, 1979). DERYCKE et GANNON (1990) produisent un modèle qui introduit le phénomène de congestion comme une source d'externalité négative. Ils parviennent à la conclusion suivante : le profil des rentes foncières de l'agglomération reflète

⁸ Lorsque l'on introduit la congestion dans le modèle de la NEU, cela revient à considérer que les routes sont des services collectifs caractérisés par un seuil d'encombrement au delà duquel l'utilisation de la route par un individu additionnel a un effet pervers pour tous les autres utilisateurs qui se traduit par une perte de temps.

celui des coûts de transports et peut être non convexe : le marché foncier ou résidentiel intègre dans ses prix les niveaux de coûts de congestion, qui viennent eux-mêmes perturber l'allure de la courbe des coûts de transports 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, toutes choses égales par ailleurs.

D'autres auteurs, enfin, se sont appliqués à montrer l'existence d'effets de capitalisation dans les biens fonciers et immobiliers du réseau de transport. Le réseau de transport peut être considéré comme un support opérant sur une surface. Les agents localisés sur cette surface ne sont pas indifférents à leur position par rapport au réseau et aux polarisations qu'il engendre et vont donc se concurrencer pour occuper certaines zones à l'intérieur de la surface. Cette concurrence pour l'occupation du sol se traduit dans la fonction des marchés immobiliers. Si les agents valorisent l'accessibilité au réseau et à ses pôles, ils sont prêts à surenchérir pour occuper le sol à proximité de ces localisations. A l'équilibre du marché foncier, la différence de prix entre deux biens fonciers identiques, sauf pour ce qui est de leur localisation, est égale à la valeur de la différence d'accessibilité au réseau. On dit que les prix fonciers et immobiliers capitalisent la valeur du bien public qu'est le réseau. ANAS (1985) a tenté d'intégrer cet effet de capitalisation dans un modèle visant à rendre compte de l'impact d'une amélioration des transports sur les valeurs des biens immobiliers en milieu urbain. Ce principe est repris dans quelques modèles interactifs.

Plusieurs modèles interactifs de transport et de localisation sont fondés sur l'approche de l'économie urbaine. En particulier, les modèles de DE LA BARRA (1989), TRANUS, et celui de MARTINEZ (1992), 5-LUT, appuient leurs mécanismes d'occupation des sols sur les concepts développés par la NEU, en essayant cependant d'apporter des adaptations par rapport aux exigences de l'opérationalité. Deux améliorations sont développées dans ces modèles, la première consiste à introduire les apports des modèles de choix discrets (décrits en première partie) en considérant non plus une fonction d'utilité totalement déterministe mais comportant un caractère aléatoire. La deuxième extension vise à remettre en question le caractère trop statique des modèles de la NEU parfois dénoncé (BONIVER, 1979). *"Tous les modèles considérés sont des modèles statiques de long terme. Or toute situation d'équilibre est en fait le résultat d'une évolution plus ou moins longue. L'analyse statique ne suffit donc pas mais doit être complétée par une*

analyse dynamique qui tiendrait compte du caractère durable de l'infrastructure urbaine ainsi que des anticipations venant affecter les décisions des ménages. La NEU se heurte cependant à la difficulté d'inclure à la fois le temps et l'espace dans un modèle continu".

3.2.2. L'approche des modèles d'interactions spatiales

La seconde tradition de la prise en compte des transports et des localisations des individus et des activités réside dans les modèles d'interactions spatiales. Leur contenu théorique est nettement plus négligeable que les précédents modèles, mais leur objectif principal est l'application empirique.

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), STEWARD (1948), ZIPF (1949), CONVERSE (1949), CLARK (1951), ISARD (1956). Les fondements de ces modèles s'inspirent principalement d'analogies aux sciences physiques et à la thermodynamique.

Les premiers modèles d'interaction spatiale se sont basés principalement sur l'analogie gravitaire. Dans ces modèles, 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 ou de façon plus abstraite, comme des dépendances, des diffusions, des opportunités. Chaque zone est décrite selon un nombre d'attributs. Les zones sont reliées aux autres par des infrastructures de transport. La forme gravitaire des modèles d'interaction spatiale établit l'interaction entre deux zones en proportion avec le nombre d'activités dans chaque zone (masse) et en proportion inverse à la friction imposée par une infrastructure particulière qui les connecte entre elles. Une première étape dans cette direction est représentée par les travaux de HANSEN (1959) qui tout en utilisant l'analogie gravitationnelle élabore un modèle de localisation des résidents comme fonction d'accessibilité aux emplois. Le modèle le plus connu est celui de LOWRY (1964). Il peut être considéré comme le premier modèle, visant l'opérationalité, à introduire le système de transport comme fortement structurant des formes urbaines, et donc le fondateur des modèles intégrés. La logique interne du modèle de LOWRY consiste en une fusion de deux hypothèses théoriques : la théorie de la base économique urbaine - qui permet d'estimer deux variables liées à la base économique, la population résidente et l'emploi dans le secteur des services - et le principe d'interaction spatiale, sous la forme de deux modèles de potentiel gravitationnel à contrainte unique, utilisés pour loger d'une part, 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 est la recherche de la proximité : le choix du lieu résidentiel est guidé par les seules considérations d'accessibilité aux lieux de travail et le choix de localisation des services se réalise en fonction de la proximité à la clientèle potentielle (CAMAGNI, 1996).

Les modèles d'interaction spatiale dérivent également de l'analogie à la thermodynamique avec les travaux de WILSON (1970) sur la maximisation de l'entropie. Il modélise, sur la base d'un modèle de maximisation de l'entropie à double contrainte, la distribution des déplacements. Cette approche apporte des bases théoriques statistiques plus solides aux modèles précédents.

En outre, plus récemment, ANAS (1983) a montré que le modèle logit multinomial résultant de la maximisation de l'utilité aléatoire de la théorie des choix discrets, était, à un niveau similaire d'agrégation, formellement équivalent au modèle de maximisation d'entropie proposé par WILSON. Ceci permet d'apporter aux modèles d'interaction spatiale les fondements théoriques économiques qui leur faisaient défaut.

De nombreux modèles d'interaction de transport et de localisation s'inspirent de la logique du modèle de LOWRY en y apportant les améliorations qu'il convient. Très tôt, ECHNIQUE (1975) combine un modèle de localisation à la LOWRY et un modèle de transport à quatre étapes. On rencontre également le modèle de BERECHMAN (1980), et les modèles plus élaborés ITLUP (1971), LILT (1974), MEP (1968) et OSAKA (1981).

3.3. PRINCIPES ET CARACTERISTIQUES DES MODELES INTERACTIFS DE TRANSPORT ET DE LOCALISATION

L'originalité essentielle de cette approche est de souligner l'importance dans le processus de planification d'intégrer les interactions entre le transport et l'occupation des sols. Les modèles interactifs de transport et de localisation obéissent à certains grands principes dans leur structure. Cependant, ce type de modèle est loin d'être institutionnalisé, et on rencontre une grande diversité de leurs bases théoriques, de leurs techniques de modélisation, des niveaux de désagrégation de l'analyse, et même de leurs objectifs.

3.3.1. Les principes généraux des modèles interactifs de transport et d'occupation des sols

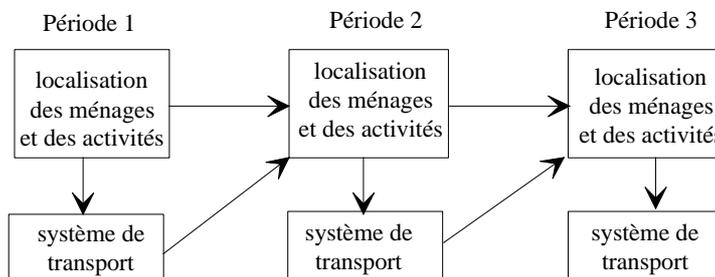
Les modèles intégrés s'efforcent de produire un mécanisme à travers lequel les effets indirects causés par le développement d'un système peuvent être transférés comme entrées dans la simulation de l'autre système. Les

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 transports, de variations des coûts de transports, de politiques de régulation de l'usage des sols, etc.

Dans ces modèles, la région urbaine est représentée comme un ensemble de zones discrètes. La dimension temporelle est représentée en subdivisant le temps en périodes de temps discrètes (entre 1 et 5 ans). Dans la plupart des cas, ce sont des modèles de simulation récurrents.

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 dont les activités entrent en interaction. Ainsi, l'espace géographique crée une séparation entre les agents localisés qui désirent interagir en vue d'accroître leur utilité ; le transport est la matérialisation mais aussi un élément contraignant ces besoins d'échange. Une structure dynamique met en relation les deux systèmes de transport et d'occupation des sols (Figure 2). L'influence des conditions de transport sur les localisations urbaines est un *feed-back* retardé : les accessibilités de la période 1 affectent les localisations des activités et des individus dans la période 2. Ainsi, un changement dans le système de transport, tel qu'une nouvelle route ou un système de transport collectif lourd, 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.

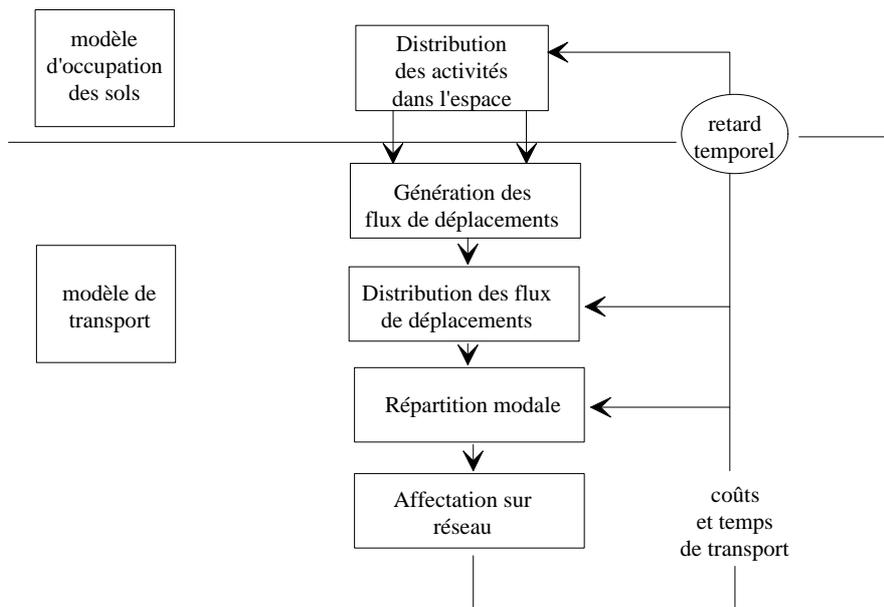
Figure 3 : Les relations dynamiques entre le système des transports et le système d'occupation des sols



Source : D'après DE LA BARRA (1996), « Optimising technics in activities-transport models », In HAYASHI, ROY (1996).

Les modèles interactifs présentent un certain nombre de rétroactions (Figure 3).

Figure 4 : La structure générale des modèles d'interaction entre transport et occupation des sols



3.3.2. Une grande variété de modèles

Depuis les années 70, un grand nombre de modèles intégrés très divers a été élaboré par différentes équipes scientifiques dans différents pays. Le Tableau 1 donne une illustration des études réalisées dans ce domaine. De nombreuses avancées ont été faites dans l'objectif de formuler un cadre théorique approprié à l'explication des comportements de choix spatiaux et par rapport aux techniques empiriques de calibrages de ces modèles. Au-delà d'une certaine uniformité, il existe des différences significatives entre les fondements théoriques des modèles, des techniques de modélisation, des variables introduites, des lois comportementales et même des objectifs poursuivis.

Tableau 1 : Les principaux modèles intégrés développés

Pays	Organisation	Principaux membres	Nom du modèle et date des premiers développements
Allemagne	Université de Dortmund	M. Wegener	DORTMUND (1977)
	Université de Dortmund	M. Wegener	IRPUD (1985)
Australie	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation, Department of Building Research	J.F. Brotchie R. Sharpe J.R. Roy	TOPAZ (1970)
	University of South Australia The Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization	M. Taylor J. Roy L. Marquez F. Ueda	SUSTAIN (1986)
Chili	Université du Chili, Santiago	F. Martinez	5-LUT (1992)
Etats-Unis	Université de Pennsylvanie	S.H. Putman	ITLUP (1971)
	Université de l'Illinois, Urbana	Boyce	BOYCE (1983)
	Northwestern University	A. Anas Duann	CATLAS (1982)
Grèce	Université de Thessaloniki	G. Giannopoulos M. Pitsiava	
Japon	Universités de Tokyo et de Nagoya	H. Nakamura Y. Hayashi K. Miyamoto	CALUTAS (1978)
Japon	Université de Kyoto	K. Amano T. Toda H. Abe	OSAKA (1981)
Pays-Bas	Université de Utrecht	H. Floor	AMERSFOORT (1976)
Royaume-Uni	Université de Leeds	R.L. Mackett A. Lodwick	LILT (1974)
	Marcial Echnique & Partners	M.H. Echenique A.J. Flowerdew D. Simmonds	MEP (1968) MEPLAN (1985)
	Transport & Road Research Laboratory	F.V. Webster P.H. Bly N.J. Poulley	
	University College London	R. Mackett	MASTER (1990)
Suède	Royal Institute of Technology	L. Lundqvist	SALOC (1973)
	Royal Institute of Technology	C. Anderstig L-G. Mattson	IMREL (1991)
Venezuela	Institute of Urbanism Université Centrale du Venezuela	T. De La Barra B. Perez	TRANUS (1982)

Tous les modèles n'introduisent pas le marché des sols de façon totalement endogène. Une autre source de différenciation est le degré de désagrégation intégré par le modèle. On rencontre ainsi des modèles très désagrégés, comme TRANUS ou 5-LUT, qui tentent de rendre compte de l'ensemble du

processus complexe de choix de décideur en fonction des alternatives qui s'offrent à lui. Dans ce cas, les modèles se fondent sur des techniques de modélisation assez complexes et leurs bases théoriques s'appuient sur l'analyse de l'économie urbaine intégrant l'apport de la théorie des choix discrets. Les modèles plus agrégés visent à produire les conditions générales du système de transport, les tendances d'urbanisation et les flux de déplacements. Ils se basent essentiellement sur les modèles d'interactions spatiales. En outre, suivant les objectifs que poursuit le modélisateur, le modèle place l'accent sur des variables du système urbain et des interrelations différentes. Par exemple, si l'objectif essentiel est de rendre compte des mécanismes d'occupation des sols, la représentation du système de transport peut être très réduite. Ainsi, le modèle consistera essentiellement en un modèle de localisation des activités et des individus, certes sur la base de calculs d'accessibilités, mais sans véritable référence au fonctionnement du système de transport. Il ne prendra pas en compte les problèmes de choix modal, les choix d'itinéraires et l'effet de la congestion. Cependant, les modèles, afin de rendre pleinement compte des interactions possibles, doivent intégrer un module de transport relativement bien détaillé, en particulier un module d'affectation capable de répercuter les modifications des conditions de transport face aux modifications d'une part de la demande de transport et d'autre part de l'offre.

3.4. LES ENSEIGNEMENTS ET LES LIMITES DES MODELES

Un bilan critique doit être dressé à propos de ce type de modèles. Dans un premier temps, nous relaterons des résultats d'une procédure d'évaluation entreprise par plusieurs équipes scientifiques consistant à comparer les principaux modèles développés. Cette étude tente d'apporter un éclairage quant aux performances de ces modèles en leur appliquant une série de tests. Dans un deuxième temps, nous porterons un regard critique plus général en reprenant la grille de lecture proposée par BONNAFOUS (1972) de jugement de l'opérationalité des modèles.

3.4.1. Un essai d'évaluation : les travaux de l'ISGLUTI

Le nombre et la diversité des modèles intégrés développés appellait un bilan 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, lancée dans les années 80 avec plusieurs universités, s'est créée 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 opérationnels⁹. Malgré les différences des modèles tant dans leurs objectifs, leurs formes et les méthodes auxquelles ils recourent, les auteurs de cette étude ont estimé que ces modèles produisaient des résultats partiellement comparables et sur lesquels une évaluation de leurs performances pouvait être réalisée. L'étude a procédé en deux phases. La première consiste à comparer les modèles existants, leurs structures, leurs mécanismes, et leurs performances, ainsi que d'évaluer leur sensibilité à un ensemble de mesures d'usage des sols et de transport. Pour des raisons pratiques, chaque modèle a été appliqué à la ville sur laquelle il avait été calibré au départ (WEBSTER, PAULLEY, 1988).

Les résultats de la première phase ont permis d'éclairer les performances de chacun des modèles et les améliorations qu'ils devaient recevoir. Les principaux enseignements des tests mettent en évidence que 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) ; le recours à des méthodes de modélisation trop rudimentaires conduit à des résultats dont la pertinence est inférieure à celle des autres ; la désagrégation de la population en différentes catégories ainsi que celle des activités paraît être relativement importante dans la qualité des résultats (DUCHIER, 1991).

Cependant, cette première phase d'évaluation 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 a essayé de surmonter ces difficultés. Elle a consisté à appliquer, premièrement, un même modèle à des villes différentes, et deuxièmement, différents modèles à une même ville. Différents tests ont été appliqués (impacts de l'évolution de la structuration urbaine et du système de transport, effets des changements de localisation des activités industrielles, sous contrainte d'usage des sols, conséquences des variations dans les coûts et les temps de transport).

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 seconde partie du test, consistant à appliquer plusieurs modèles à une même ville, et représentant un test relativement rigoureux,

⁹ Les neuf modèles étudiés sont les suivants : TOPAZ (1970), DORTMUND (1977), CALUTAS (1978), OSAKA (1981), AMERSFOOT (1976), SALOC (1973), LILT (1974), MEP (1968), MEPLAN (1988) et ITLUP (1971).

s'est révélée délicate. Les chercheurs se sont en effet 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 du fait de la non disponibilité des données à un niveau de détail approprié pour satisfaire les performances du modèle.

De façon générale, les auteurs de l'étude concluent que 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. Sur certains résultats, une 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 souligne les différences fondamentales des modèles dans la construction de 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, et dans tous les cas, elle est plutôt due à des problèmes dans l'application des modèles (qualité des données insuffisante, calibrage et validation inadéquate) que des problèmes de définition des mécanismes de comportements et de causalités.

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. 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. En revanche, les modèles ne parviennent pas à une conclusion convergente sur les impacts des modifications des coûts de transports sur l'occupation des sols. Cependant, la plupart montrent un effet minime des politiques de transports 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, qu'en égard aux résultats de l'étude ISGLUTI, les modèles interactifs de transports et des localisations soient plus largement acceptés qu'auparavant¹⁰. Cependant, cette série de tests ne constitue pas vraiment une procédure de recherche de validité de ces modèles. L'ultime test de validation consisterait en l'application de ces modèles 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

¹⁰ On peut souligné à ce titre qu'une tentative d'application d'un modèle d'interactivité sur une agglomération française (Lyon) est en cours actuellement. Ce projet, initié par le CERTU, vise à appliquer le modèle TRANUS, développé par DE LA BARRA.

solution serait de tester un programme d'investissement majeur en transport, 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).

3.4.2. De l'opérationnalité des modèles interactifs

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 (BONNAFOUS, 1972).

Ils visent en particulier une plus grande pertinence en regard de 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 des problèmes de cohérence.

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.

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 surmonter cette difficulté, en apportant des bases théoriques assez bien établies et une meilleure prise en compte des comportements réels des agents.

4. CONCLUSION

La méthodologie des modèles d'analyse et de prévision des déplacements est passée par plusieurs phases. La "méthode classique" privilégiant une approche à long terme et assez grossière du système, très développée dans les années 60, a fait l'objet de fortes critiques. Elle a été supplantée par les modèles désagrégés se focalisant sur l'analyse des comportements et sur un

horizon de plus court terme. Ces modèles s'adressent principalement aux gestionnaires des systèmes de transport et permettent de tester de façon plus ou moins fine les impacts de politiques de réduction de la congestion urbaine. Cependant, devant le manque d'efficacité des politiques de transport menées jusqu'alors et l'émergence de la problématique du développement durable, la nécessité de s'orienter vers des procédures de planification stratégique à long terme et le besoin de nouveaux outils de modélisation, se sont imposés. D'où l'intérêt des modèles interactifs de transport et d'occupation des sols qui insistent sur l'importance d'inclure les interactions entre le système de transport et les mécanismes d'occupation des sols.

L'évaluation de ces modèles ne parvient pas à une conclusion unanime, le bilan est relativement mitigé. Il est indéniable que ces modèles doivent faire encore l'objet de perfectionnements. 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 négligée, notamment dans leur possibilité d'intégrer l'évaluation des effets sur l'environnement¹¹.

Les modèles interactifs de transport et d'occupation des sols présentent ainsi un véritable défi et une entreprise difficile.

BIBLIOGRAPHIE

ANAS A., MOSES L. (1979) Mode choice, transport structure and urban land use. **Journal of urban economics**, n° 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.

BALAVOINE E. (1981) **La prévision de la demande de transports urbains**. Thèse d'Etat en Sciences Economiques, Bordeaux, Université de Bordeaux 1.

BATES J., BREWER M., HANSON P., McDONALD D., SIMMONDS D. (1993) Building a strategic model for Edinburgh. **21st Summer annual meeting, PTRC**, Manchester, 13-17 September.

¹¹ Les membres du groupe "Transport and Land Use" de la WCTRS (*World Conference on Transport Research Society*) ont insisté, lors d'une conférence se tenant en Australie en décembre 1993, sur la nécessité de se fonder sur ce type de modèles afin d'évaluer les effets sur l'environnement.

BEN-AKIVA M., LERMAN S.R. (1985) **Discrete choice analysis. Theory and application to travel demand.** England, The MIT Press.

BEN-AKIVA M., LERMAN S.R. (1979) Disaggregate travel and mobility-choice and measures of accessibility. in D.A. HENSHER, P.R. STOPHER (Eds), **Behavioral travel modeling.** London, Croom Helm, pp. 654-679.

BONIVER V. (1979) Un aperçu de la nouvelle microéconomie urbaine. **Revue d'économie régionale et urbaine**, n°3/4, pp 326-361.

BONNAFOUS A. (1972) **La logique de l'investigation économétrique.** Thèse pour le Doctorat ès-Sciences Economiques, Lyon, Université Lumière Lyon 2.

BONNAFOUS A. (1976) La demande de transports de voyageurs en milieu urbain, méthodologie de l'analyse et de la prévision. **C.E.M.T., Table Ronde**, n°32, Paris.

BONNAFOUS A., PUEL H. (1983) **Physionomies de la ville.** Paris, Les éditions ouvrières, Série « Initiation Economique », 157 p.

CAMAGNI R. (1996) **Principes et modèles de l'économie urbaine.** Bibliothèque de Science Régionale, ASRDLF, Paris, Economica, 377 p.

CEMT, OCDE (1995) **Transports urbains et développement durable.** Paris, CEMT, OCDE.

DE LA BARRA T. (1989) **Integrated land use and transport modeling - Decision chains and hierarchies.** Great Britain, Cambridge Urban and Architectural Studies, Cambridge University Press, 167 pp.

DE PALMA A., MARCHAL F. (1996) Metropolis : un outil de simulation du trafic urbain. **Transports**, n°378, juillet-août, pp. 304-315.

DE PALMA A., THISSE J-F. (1987) Les modèles de choix discrets. **Annales d'économie et de statistique**, n°9, pp. 151-190.

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 (1982) **Economie et planification urbaines - Tome 2 : Théories et modèles.** Collection Paris, Themis Sciences Economiques. PUF.

DOMENCICH T.A., McFADDEN D.L (1975) **Urban travel demand : a behavioral Analysis.** Amsterdam North-Holland.

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, Lyon, LET.

- GANNON F. (1992) **Modèles de la ville et politiques urbaines optimales**. Thèse pour le Doctorat ès Sciences Economiques, Paris, Université Paris X Nanterre.
- HAYASHI Y., ROY J. (1996) **Transport, land use and the environment**. The Netherlands, Kluwer Academic Publishers., 420 pp.
- JONES D., MAY T., WENBAN-SMITH A. (1990) Integrated transport studies : lessons from the Birmingham study. **Traffic engineering + control**, novembre 1990, pp. 572-576.
- LEE D. (1973) Requiem for large Models. **Journal of the American Institute of Planners**, N° 39, pp. 163-178.
- 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.
- LOWRY I. S. (1964) **A model of metropolis**. Santa Monica, CA : Rand Corporation.
- MACKETT R.L. (1993) Structure of linkages between transport and land use. **Transportation Research - B**, Vol. 27B, N°3, 189-206.
- MARTINEZ F. (1995) Access : the transport-land use economic link. **Transportation Research**, Vol. 29 B, N°6, pp. 457-470.
- 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.
- 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, 223-247.
- MERLIN P. (1984) **La planification des transports urbains**. Paris, Masson.
- MEYER M. D, MILLER E. J. (1984) **Urban transportation planning - A decision-oriented approach**. University of Pennsylvania, McGraw-Hill Series in Transportation, Consulting Editor.
- OLDFIELD R.H. (1993) A strategic transport model for the London area. **Research Report 376**, Crowthorne, Berkshire, Transport Research Laboratory.
- RAUX C. (1983) **Modèles et prévision des comportements de mobilité quotidienne**. Thèse pour le Doctorat de Docteur-ingénieur en Economie des Transports, Lyon, Université Lumière Lyon 2.

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.

SEN A., SMITH T. (1995) **Gravity models of spatial interaction behavior**. Berlin, Springer, 554 p.

TABOURIN E., ANDAN O., ROUTHIER J.L. (1995) **Les formes de la croissance urbaine : le modèle de René Bussière appliqué à l'agglomération lyonnaise**. Rapport de recherche PIR-Villes-CNRS, Lyon, LET.

VERMOT-DESROCHES B. (1994) Interactions spatiales. In AURAY, BAILLY, DERYCKE, HURIOT (sous la dir.), **Encyclopédie d'économie spatiale**. Paris, ASRDLF, Economica.

WEBSTER F.V., BLY P.H., JOHNSTON R.H., PAULLEY N., DASGUPTA M. (1985) **Evolution des déplacements urbains**. Paris, Conférence Européenne des ministres des transports (CEMT).

WEBSTER F.V., BLY P.H., PAULLEY N.J (Eds) (1988) **Urban Land-Use and Transport Interaction - policies and models - Report of the International Study Group on Land-use / Transport Interaction (ISGLUTI)**. Great Britain, Ipswich Book Ltd, 504 p.

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.

WIEL M. (1994) Comment articuler la planification des déplacements et les stratégies urbaines ? **Recherche, Transports, Sécurité**, n°44, pp. 59-70.

WILLIAMS I., BATES J. (1993) APRIL, a strategic model for road pricing. **21st Summer annual meeting, PTRC**, Manchester, 13-17 september.

WILSON A.G. (1970) **Entropy in urban and regional modelling**. London, Pion.

YOUNOSSI G. (1991) **Développement d'un modèle intégré de transport et d'urbanisme : son application à l'agglomération Bordelaise**. Thèse pour le Doctorat ès Sciences Economiques, Bordeaux, Université de Bordeaux I.