



Rapport du Laboratoire d'Économie des Transports
Pour le compte de la DRAST (Ministère de l'Équipement) et de l'ADEME dans le
cadre du groupe 11 du PREDIT

Modèles d'interaction entre transport et urbanisme : état de l'art et choix du modèle pour le projet SIMBAD

*Rapport intermédiaire n°1 du projet Simbad
Simuler les MoBilités pour une Agglomération Durable*

Juillet 2005

Auteurs : Ghislaine Deymier
Jean-Pierre Nicolas

Sommaire

1. Introduction	3
2 Les fondements théoriques et les outils des modèles d'interaction entre transport et urbanisme	5
2.1. <i>Un ensemble de sous-systèmes aux temporalités différentes</i>	5
2.2. <i>Les outils théoriques et méthodologiques développés pour représenter ces interactions</i>	7
3 La structure des modèles LUTI et leur classification	11
3.1. <i>Les modèles statiques</i>	12
3.2. <i>Les modèles quasi-dynamiques</i>	16
3.3. <i>Les nouvelles modélisations des interactions entre transport et urbanisme</i>	27
3.4. <i>Un tableau de synthèse des différents modèles évoqués</i>	30
4. Le choix d'URBANSIM	35
Annexe : données recensées sur l'aire urbaine de Lyon	39
Bibliographie	45
Plan détaillé	47

1. Introduction

Le projet *SIMBAD* a pour objectif d'établir un modèle de simulation à long terme de la mobilité urbaine dans une perspective de développement durable. Pour cela, différents scénarios de politiques de transport et d'urbanisme seront testés afin de mettre en évidence leurs impacts sur les enjeux environnementaux, économiques et sociaux des déplacements de personnes et de marchandises réalisés au sein de l'aire urbaine.

Le modèle *TÉLESCOPAGE*, développé au sein du Laboratoire d'Économie des Transports, sert de point de départ au projet mais sera réactualisé sur de nombreux points, avec notamment la recherche d'une meilleure prise en compte des interactions entre les transports et l'urbanisme. L'objectif de ce rapport est de fournir un état des lieux théorique et pratique de la modélisation sur cette question des liens entre transports et urbanisme pour déboucher sur un choix argumenté du modèle qui sera repris et utilisé dans le cadre de *SIMBAD*.

En effet, si l'occupation des sols influence le système de transport, en retour, les investissements en projets d'infrastructure ont également un impact sur les décisions de localisation des ménages et des entreprises, comme sur la planification de l'espace urbain. L'importance de ces interdépendances entre système de transport et d'occupation des sols dans les processus de planification constitue le fondement des modèles d'interactions de transport et d'urbanisation.

Les premiers modèles de transport / urbanisation recensés au début du siècle précédent sont assez descriptifs ou analytiques. Parmi les plus influents, on trouve le modèle de Von Thünen qui a cherché à expliquer la localisation des activités agricoles autour des villes en considérant que le seul facteur de structuration de l'espace est constitué par la distance des terres au marché urbain. Burgess a développé, au milieu des années 20, un modèle fondé sur la théorie des zones concentriques et Hoyt (1939) a construit un modèle basé sur des processus à structure radiale qui délimitent des secteurs particuliers en forme de cône¹.

Bien que dans la majorité des cas, ces modèles n'apportent que de faibles justifications théoriques ou se trouvent dépassés et limités pour décrire la situation des villes actuelles, ils ont fourni un cadre environnemental de simulation urbaine important et une base solide sur laquelle peuvent s'appuyer les travaux les plus récents dans ce domaine. Le facteur important de différenciation entre les modèles descriptifs ou analytiques et les modèles d'interactions, est que les premiers expliquent comment les phénomènes urbains émergent, mais généralement ils occultent la question de savoir pourquoi ces configurations se matérialisent.

Depuis le modèle de Lowry (1964), de nombreux modèles d'interaction entre transport et urbanisme se sont développés. Ils sont très diversifiés, tant du point de vue des soubassements théoriques sur lesquels ils s'appuient, que des techniques de modélisation qu'ils emploient. C'est pour clarifier ce contexte au contenu hétérogène que ce rapport établit un état de l'art des différentes approches dites "*LUTI*" (*Land Use and Transport Interaction*) les plus fondamentales afin de déterminer quel type de modèle existant s'adapte le mieux à la problématique du projet *SIMBAD*.

¹ Pour une analyse plus détaillée de ces modèles nous renvoyons à la littérature existante (Camagni, 1996, Torrens, 2000)

Le bilan réalisé dans ce rapport se décompose en trois grandes étapes.

- ✓ Une première partie propose une première approche du champ de la modélisation des interactions entre transport et urbanisme en qualifiant plus précisément ces interactions puis en présentant les outils conceptuels et méthodologiques qui ont été développés et utilisés depuis les années 60 pour les représenter.
- ✓ La partie suivante s'attache plus à montrer comment, dans la pratique, ces outils ont été mobilisés dans les modèles. Une typologie classique est retenue (Simmonds, Bates, 1999), permettant d'ordonner la présentation des principaux modèles transport urbanisme qui est faite ici.
- ✓ Enfin, une dernière partie fournit la discussion argumentée qui nous a conduit à sélectionner le modèle *URBANSIM* parmi tous les modèles passés en revue.

2 Les fondements théoriques et les outils des modèles d'interaction entre transport et urbanisme

La complexité des interactions transport/urbanisation conduit à construire des modèles destinés à prévoir et analyser le développement des systèmes urbains à un niveau de détail tel qu'ils puissent intégrer les processus les plus essentiels du développement spatial urbain. Après avoir présenté ces interactions et les rythmes très différents qui les animent (§2.1.), nous nous pencherons plus avant sur les théories et les méthodes qui ont été développées pour les représenter (§2.2.).

2.1. Un ensemble de sous-systèmes aux temporalités différentes

Ainsi par exemple, Wegener (1994) distingue huit types de sous-systèmes urbains : les réseaux, le mode d'occupation des sols, les lieux d'emploi, les lieux de résidence, l'emploi, la population, le transport de marchandises et les déplacements de personnes. Un modèle interactif devrait prendre en considération au moins deux de ces sous modèles, qui peuvent être ordonnés selon la vitesse à laquelle ils se transforment, c'est-à-dire leur temporalité (du long terme au court terme). Wegener et Fürst (1999) ont établi une classification de ces sous-systèmes urbains allant du processus le plus lent au plus rapide :

- ✓ Changement très lent : *réseaux, occupation des sols*. Le transport urbain, les réseaux de communications et d'utilité sont les éléments les plus permanents de la structure physique des villes. Les grands projets d'infrastructure nécessitent une décennie voire plus et une fois en place, ils sont rarement abandonnés. La distribution de l'occupation des sols est également stable ; elle change seulement de façon résiduelle.
- ✓ Changement lent : *lieux d'emplois, logements*. Les logements ont une durée de vie supérieure à un siècle et leur construction prend plusieurs années. Les lieux d'emplois (bureaux, usines, centre commerciaux, etc.) existent plus longtemps que les entreprises ou les institutions qui les occupent.
- ✓ Changement rapide : *emploi, population*. Les entreprises s'établissent, se ferment, se délocalisent, etc., et par conséquent créent de nouveaux emplois ou bien affectent l'emploi. Les ménages, en fonction de leur cycle de vie, ajustent leur consommation de logement et leur motorisation ; ce qui détermine la distribution de la population et des propriétaires de voiture individuelle.
- ✓ Changement immédiat : *les biens transports, déplacements*. La localisation des activités dans l'espace donne lieu à une demande d'interaction spatiale sous la forme de biens transport ou de déplacements. Ces interactions sont le phénomène le plus flexible du développement spatial urbain ; elles peuvent s'ajuster à la minute ou à l'heure aux changements de la congestion ou aux fluctuations dans la demande bien qu'en réalité les ajustements puissent être retardés par des habitudes, etc.

Enfin, ces auteurs distinguent un neuvième sous-système, l'environnement, dont le comportement temporel est particulièrement complexe du fait de sa définition très large, allant du cadre de vie urbain local aux grands équilibres biophysiques de la planète. L'impact direct des activités

humaines, tel que le bruit des transports et la pollution de l'air est immédiat. D'autres effets tels que la contamination de l'eau ou du sol augmentent de jour en jour. Les effets du climat à long terme sont tellement lents qu'ils sont difficilement observables. Tous les autres sous-systèmes affectent l'environnement par leur consommation d'espace et d'énergie, la pollution de l'air et les émissions de bruit. Tandis que seuls les choix de localisation des investisseurs en logements, des ménages, des firmes et des employés sont co-déterminés par la qualité de l'environnement.

Tous ces sous-systèmes sont en partie soumis au marché et en partie, sujets aux politiques de régulation.

La figure ci-dessous représente la boucle de rétroaction des interactions entre transport et urbanisation définie par Wegener.

Figure 1 : Boucle de rétroaction transport/urbanisation (Wegener, 1994)

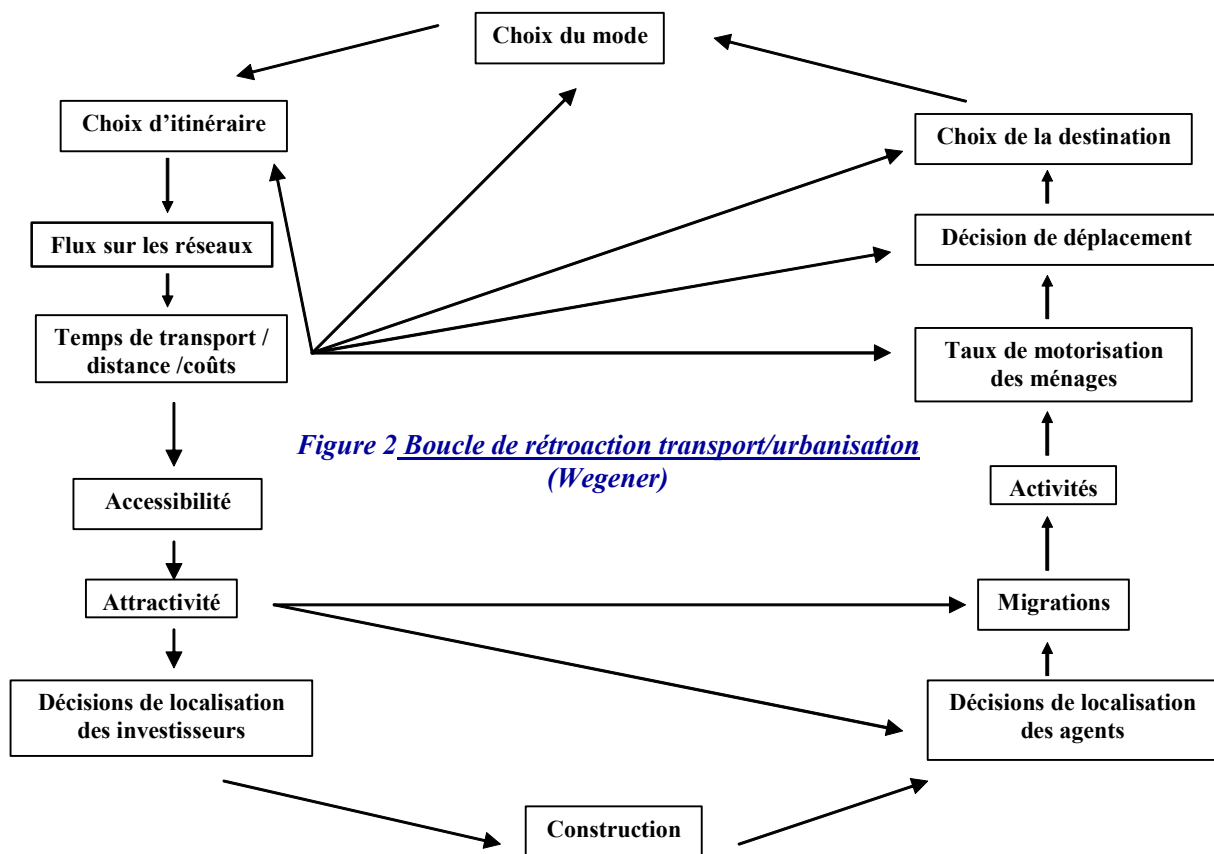


Figure 2 Boucle de rétroaction transport/urbanisation (Wegener)

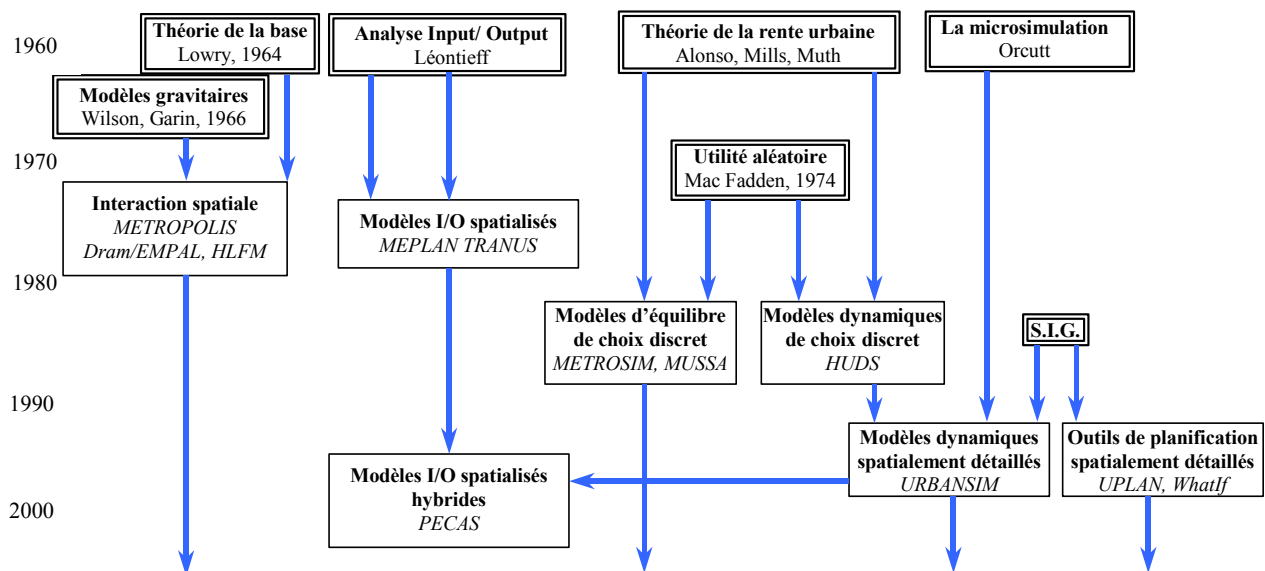
La distribution des modes d'occupation des sols urbains, telles que les zones résidentielles, industrielles ou commerciales, détermine la localisation des activités humaines (résidence, travail, achats, éducation ou loisir). La distribution de ces activités entraîne des interactions spatiales matérialisées par des déplacements qui s'effectuent sur les réseaux de transport en fonction du choix de la destination, du taux de motorisation et du mode de déplacement. S'ensuit alors la formation des flux sur les réseaux qui déterminent les conditions de l'accessibilité (temps de transport, coût, distance, congestion), qui, elles-mêmes couplées au niveau d'attractivité de la zone, influencent les décisions de localisation des investisseurs et celles des nouvelles constructions. Par

conséquent le système d'urbanisation se trouvant modifié, il engendre une révision des décisions de localisation des résidents et des activités.

2.2. Les outils théoriques et méthodologiques développés pour représenter ces interactions

Depuis le modèle de Lowry (1964), de nombreux auteurs ont cherché à modéliser cette boucle de rétroaction entre le système de transport et l'urbanisation. La théorie de la base et la théorie de la rente urbaine constituent sans doute deux des approches les plus fécondes en la matière. Elles ont ensuite pu être enrichies par des outils conceptuels et méthodologiques qui ont assuré le développement de la recherche sur ce champs de la modélisation. Par ailleurs, un modèle peut combiner différentes approches théoriques et différents outils comme l'illustre le schéma ci-dessous proposé par Waddell (2005).

Figure 2 : évolutions des théories et des outils des modèles LUTI



Source : Waddell, 2005²

Cette partie propose de reprendre les différents supports théoriques et méthodologiques que l'on retrouve sur ce schéma pour les présenter rapidement. Ceci permettra ainsi au lecteur de s'y retrouver plus aisément lorsque nous présenterons dans la partie suivante les différents modèles auxquels nous nous sommes intéressés.

Dans 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 par 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,

² Waddell P., 2005, *UrbanSim : Integrating Land Use and Transport*. LET, présentation PowerPoint.

les activités basiques sont donc exogènes et leur croissance est une donnée. Les activités basiques constituent le moteur de croissance économique de la zone d'étude.

Dans l'analyse de la **matrice Input/Output de Leontieff**, le système d'activités est représenté par un modèle comptable spatial d'entrées-sorties. A partir d'une segmentation des secteurs économiques est définie la matrice de leurs échanges, ce qui constitue la matrice input/output. Dans les modèles urbains, l'approche des matrices input/output est utilisée afin de représenter les liens entre les acteurs. Tous les secteurs économiques se "consomment" mutuellement. L'industrie "consomme" des ménages qui consomment des services et du terrain. Les activités de service consomment des ménages et du terrain, etc. Ces consommations d'input forment la matrice input/output et permettent de calculer les niveaux des besoins d'échange, c'est-à-dire les "flux fonctionnels".

Cette mise en forme des données est souvent associée à la théorie de la base pour distinguer les différents types d'activités qui entrent dans la matrice, comme dans les cas des modèles *TRANUS* ou *MÉPLAN* que nous verrons plus loin.

La **théorie de la rente urbaine** suggère que les valeurs des sols résultent d'un arbitrage entre les coûts de transport et l'accessibilité. Elle se base sur l'hypothèse fondamentale du modèle monocentrique (Alonso, Muth, Mills), qui stipule que les coûts de transport augmentent avec la distance au centre d'emploi (*CBD*) et sont identiques pour l'ensemble des ménages suburbains. Par conséquent, les rentes et les densités diminuent avec la distance au centre.

Dans sa forme statique initiale, cette approche débouche sur des **modèles d'équilibre** où, étant donné l'état des variables d'entrée, les valeurs des variables de sortie sont directement calculées et fixées pour l'horizon de la simulation. Certains des prolongements qui ont suivi ont porté sur des **représentations dynamiques** au sein des modèles : les valeurs fournies en période initiale permettent de déduire les résultats en période intermédiaire, qui influent ensuite sur la période suivante, et ainsi de suite jusqu'à l'horizon de la simulation, sans qu'un équilibre ne soit forcément obtenu *in fine*.

Les outils fournis par la **théorie de l'utilité aléatoire** ont également enrichi cette approche du modèle monocentrique. Une formulation probabiliste permet 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. Un individu choisit une localisation résidentielle parmi un ensemble de choix. Il attribue à chaque localisation une fonction d'utilité définie en fonction des attributs de la zone. En comparant ces différentes utilités, l'individu 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. L'utilité totale se décompose alors de la façon suivante :

$$U = V + e \quad (1)$$

Où U représente l'utilité totale,
 V, la part déterministe (les attributs du logement, le revenu, la profession)
 e, la composante aléatoire, c'est-à-dire les erreurs dues au manque d'information ou à la rationalité dans laquelle le décideur fait ses choix.

Les **modèles gravitaires** sont fondés sur les hypothèses mathématiques de la loi gravitationnelle de Newton qui stipulent que la force d'attraction entre deux corps est le produit de leur masse divisé par le carré de leur distance. Transféré par analogie à un contexte géographique, la force peut être représentée par le nombre de flux (de déplacements) entre deux régions et la masse peut être assimilée à une variable structurelle telle que la taille de la population. On se donne ainsi une mesure de la capacité des régions à attirer ou bien à générer des déplacements. Ces modèles sont généralement de la forme :

$$T_{i,j} = k_{i,j} \cdot M_i \cdot M_j \cdot f(B, d_{i,j}) \quad (2)$$

où,

$T_{i,j}$ représente la variable d'interaction qui exprime en unité physique ou monétaire le lien de dépendance spatiale entre la zone d'origine i et la zone de destination j .

$k_{i,j}$ est un coefficient de proportionnalité.

M_i représente le poids économique de la zone i (population, revenu global, etc.). C'est un facteur émetteur générateur d'interaction.

M_j représente le poids économique de la zone j de destination. C'est un facteur d'attraction générateur d'interaction.

f est une fonction quelconque positive.

B est un ensemble de paramètres.

$d_{i,j}$ une distance géographique ou économique séparant les deux zones i et j .

Enfin, en matière de LUTI, une des contributions majeures est celle de Wilson (1970) avec le concept d'**entropie** issu de la thermodynamique. Son usage permet, 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 »).

Ce principe permet de définir la configuration la plus probable des déplacements $T_{i,j}$ comme celle qui associe et représente le plus grand nombre de « *microétats* » du système, c'est-à-dire les localisations d'emplois et de résidences de chaque individu.

Le nombre de « *microétats* », ou nombre de façons dont les individus d'une population donnée peuvent être assignés à la matrice $T_{i,j}$, est donné par :

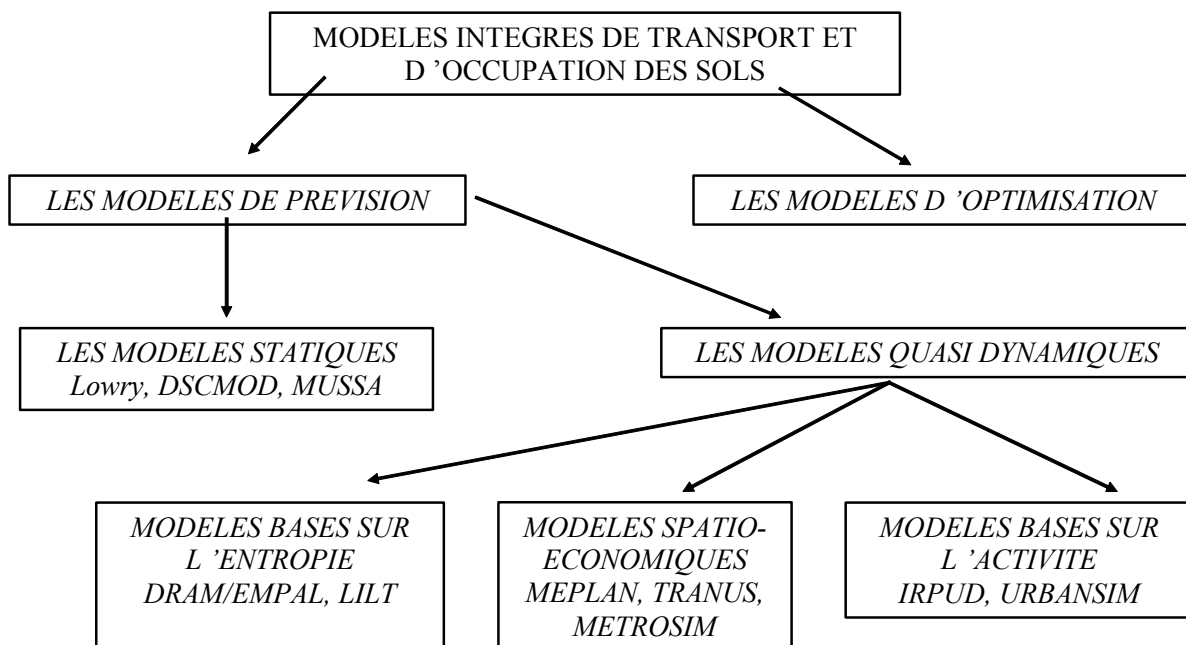
$$S(T_{i,j}) = \frac{T!}{\prod_i \prod_j T_{i,j}!} \quad (3)$$

où S est l'entropie du système.

3 La structure des modèles LUTI et leur classification

Aujourd'hui, il existe un panel de modèles *LUTI* dont la diversité peut être résumée à partir de la classification en cinq groupes établie par Simmonds et Bates (1999) illustrée par la figure ci-dessous. Plutôt qu'une interrogation sur l'historique des outils et méthodes développés dans ce champ de la modélisation comme c'était le cas de la présentation de Paul Waddell que nous avons retenue dans la partie précédente, cette classification s'intéresse d'abord aux finalités et aux possibilités offertes par les différentes familles de modèles.

Figure 3 : Classification des modèles LUTI (Simmonds & Bates, 1999)



Un premier groupe de modèles a pour objet **d'optimiser les configurations urbaines** plutôt que de prédire les impacts des politiques de transport sur l'évolution de la structure urbaine. Ces modèles sont généralement utilisés dans une perspective de planification à long terme mais ils ne sont pas, en principe, adaptés à la prévision des impacts des politiques de transport et d'aménagement sur l'évolution des aires urbaines préexistantes.

Parmi les modèles de prévision, on distingue deux classes de modèles : ceux statiques et ceux quasi-dynamiques. Les **modèles statiques** s'appliquent à un moment donné dans l'espace-temps, alors que les modèles **quasi-dynamiques** fonctionnent sur plusieurs périodes de temps, ainsi peuvent-ils prendre en compte les changements du système des transports qui nécessitent généralement plus d'une période de temps pour avoir un impact sur l'occupation du sol. Nous présenterons ci-dessous plusieurs modèles issus de ces deux familles avant d'évaluer leur intérêt pour le projet Simbad.

Ces auteurs font également une autre distinction que nous reprendrons à notre compte, en séparant les modèles “ *pleinement intégrés* ” et ceux qui sont “ *connectés* ” :

- ✓ Les modèles “ *pleinement intégrés* ” possèdent une certaine rigueur théorique. Les matrices *O-D* sont déterminées à l'intérieur du module d'affectation d'usage des sols. Par exemple dans *TRANUS* (cf. ci-après), les lieux de résidence et d'emplois sont déterminés à l'intérieur du module de marché du logement (les ménages, qui font un arbitrage entre coût de transport et rente foncière, sont alloués aux localisations résidentielles conditionnellement à leurs lieux de travail).
- ✓ Dans les modèles “ *connectés* ”, les localisations résidentielles sont déterminées par rapport au niveau d'accessibilité potentielle aux zones d'emplois, mais les lieux d'emplois ne peuvent être déterminés qu'à partir de la distribution des déplacements déterminée par le module de transport. L'approche par les modèles connectés implique des processus de localisations résidentielles relativement longs et dépendants d'une variété de facteurs telle que l'accessibilité aux emplois. La modélisation des choix de localisation résidentielle serait pourtant apparemment plus flexible.

3.1. Les modèles statiques

La plupart des premiers modèles d'occupation des sols étaient des modèles statiques qui essayaient de prévoir la localisation de certaines variables en considérant les autres variables comme données (Lowry, 1964). De tels modèles ne pouvaient donc pas représenter de façon réaliste les processus de changement urbain, qui par nature prennent un certain temps pour réagir à n'importe quel changement de situation, comme nous l'avons vu en §2.1. avec la présentation de Wegener (1994).

Ainsi, les modèles statiques ne reflètent pas réellement le fait que seulement une fraction des ménages et des actifs se déplace dans une période de temps donnée et que les marchés fonciers et immobiliers s'ajustent continuellement vers un équilibre peuvent ne jamais atteindre. Le développement urbain est un processus incrémental dans lequel les changements apparaissent à la marge, à partir de la distribution existante des activités, des infrastructures, du logement et de l'espace non résidentiel.

Ces modèles statiques restent cependant toujours utilisés aujourd'hui pour deux raisons principales. D'une part, ils constituent un moyen économe de prendre en considération l'impact du système urbain sans pour autant s'engager dans un travail fastidieux de construction d'un modèle dynamique. D'autre part, les modèles statiques définissent un état d'équilibre dont l'intérêt est de permettre une caractérisation voire une quantification des déséquilibres à l'origine des processus de changement urbain (Simmonds, Echenique, Bates, 1999).

Cette catégorie de modèles s'appuie sur deux méthodes :

- ✓ l'approche “ *single input* ” : l'accessibilité issue du modèle de transport permet de déterminer les modes d'usage du sol (cf. *IMREL*, *MUSSA*);
- ✓ l'approche “ *double input* ” : elle explore les impacts des stratégies de transport alternatives, par rapport à une hypothèse de base (cf. *DSCMOD*).

3.1.1. Le modèle METROPOLIS de Lowry (1964) : à l'origine de la modélisation des formes urbaines

METROPOLIS a pour objet d'évaluer l'impact des décisions publiques sur la forme métropolitaine et de prévoir les changements des formes métropolitaines au cours du temps qui sont la conséquence de changements 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. Ce modèle imbrique deux modèles d'interaction spatiale : un modèle de localisation résidentielle, et d'autre part, un modèle de localisation de l'emploi industriel et de services.

L'hypothèse principale de ce modèle est que la croissance urbaine est fonction de l'expansion du secteur basique (industriel), ce dernier contribuant à déterminer la distribution spatiale de la population et de l'emploi dans le secteur des services. Ce niveau d'influence est relié aux coûts de transport.

La faiblesse de la spécification des modèles d'interaction spatiale utilisés par Lowry a conduit Wilson et Garin (1966) à apporter quelques améliorations telles que la méthode de la maximisation de l'entropie ou des modèles gravitaires sous contrainte de production.

Enfin, le modèle de Lowry correspond à une vision instantanée de la ville : les emplois basiques sont figés, de même que les surfaces à leur réserver ou les superficies vacantes ou inutilisables. Le modèle est donc entièrement statique, bien que la procédure itérative de résolution du modèle puisse 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. Il adopte la même structure de base, mais afin d'améliorer le pouvoir explicatif du modèle, il désagrège la population pour faire apparaître différents groupes socio-économiques.

3.1.2. Les développements récents des modèles statiques

Plus récemment, dans les années 90, d'autres modèles statiques se sont développés tels que *DSCMOD* (Simmonds, 1991), *IMREL* (Anderstig et Mattson, 1991) ou encore *MUSSA* (Martinez, 1992) démontrant le réel intérêt de ce type de modélisation pour représenter l'interaction entre transports et urbanisation.

a) Le modèle *DSCMOD* (1991)

DSCMOD a été créé par David Simmonds (1991) dans l'optique d'intégrer dans les modèles de transport les considérations relatives à l'occupation du sol permettant l'analyse des changements de l'espace urbain étant donné les différentes stratégies de transport. Ce modèle a été utilisé à un niveau urbain dans les villes d'Edinburgh, Merseyside, Bristol et Sao Paulo avec le modèle de transport *START*, à Bristol avec le modèle *TRAM* et à Dublin avec un modèle de coûts généralisés issu du modèle de transport *SATURN*.

La région principale d'application de *DSCMOD* est l'Europe. Ce modèle a existé sous différentes formes depuis 1991 en utilisant une représentation *ad hoc* de l'offre de transport (transport de passagers et de marchandises). Il a permis notamment d'examiner les impacts du tunnel sous la Manche (Simmonds et Jenkinson, 1993), de la ligne TGV-EST (Paris-Strasbourg, 1993, 1994), etc.

Les configurations de l'espace urbain et du système de transport étant supposées connues, les changements d'occupation des sols résultent de l'accessibilité produite par les stratégies de transport alternatives.

C'est un modèle strictement comparatif. Il calcule les changements d'occupation des sols basés sur les changements d'accessibilité entre deux ensembles d'input.

b) Le modèle IMREL (1991)

Le modèle intégré de localisation résidentielle et d'emploi, *IMREL*, développé par Anderstig et Mattson en Suède en 1991, est un modèle statique d'allocation développé pour la planification urbaine et la recherche nécessitant un modèle de transport externe, en l'occurrence *EMME/2*.

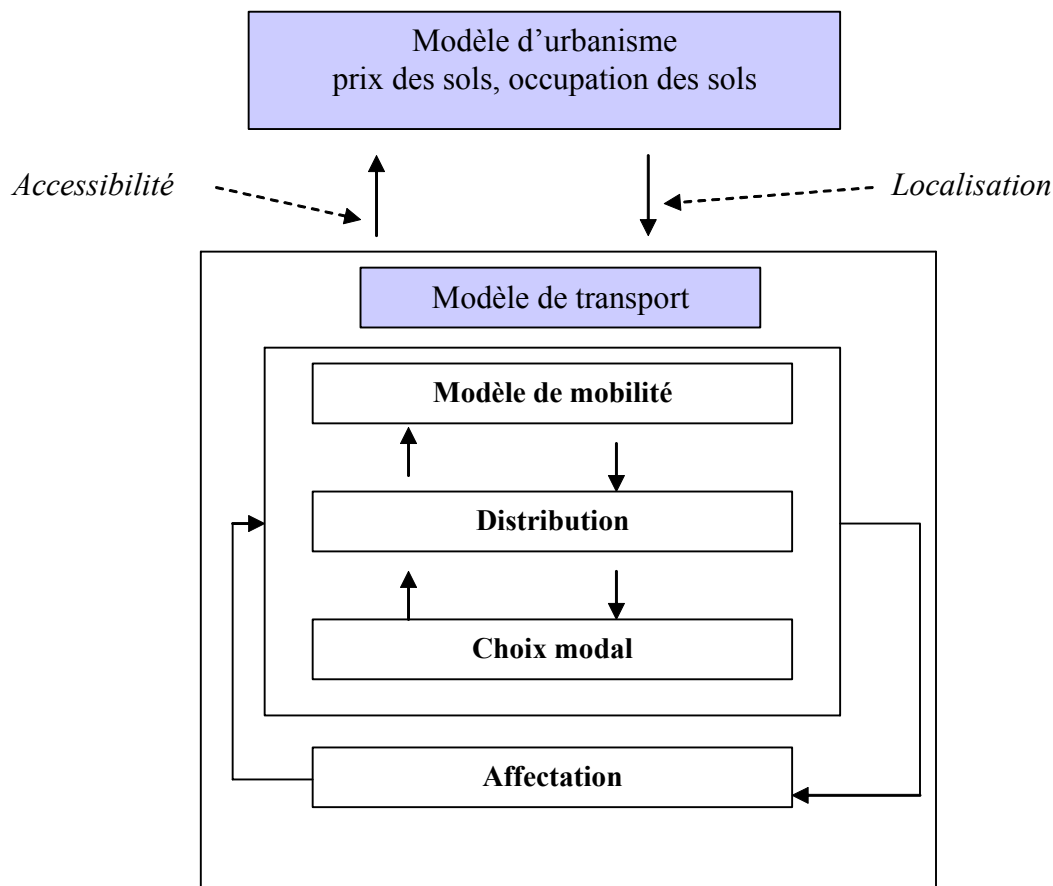
Contrairement à *DSCMOD*, il estime les schémas d'équilibre des modes d'occupation des sols en tenant compte de l'accessibilité produite par le modèle de transport. En outre, il utilise une analyse en section croisée produisant un schéma d'occupation des sols qui repose sur un seul ensemble de vecteurs d'accessibilité fourni par une exécution du modèle de transport.

c) le modèle MUSSA (1992, 1997)

Enfin, la contribution majeure de *MUSSA*, développé par Martinez (1992, 1997) pour la ville de Santiago du Chili est, d'après Simmonds et Echenique (1999), de fournir des illustrations des travaux de Martinez sur la mesure de l'accessibilité. C'est un modèle relié au modèle de transport traditionnel à quatre étapes *ESTRAUSS*.

MUSSA se distingue de *DSCMOD* et *IMREL* sur plusieurs points. Il prédit un schéma complet d'occupation de l'espace étant donné un ensemble particulier d'inputs accessibilité. Contrairement à *DSCMOD* et *IMREL*, *MUSSA* et *ESTRAUSS*, respectivement les modèles d'occupation des sols et de transport, sont itérés jusqu'à l'équilibre, tout du moins jusqu'à atteindre certaines conditions d'équilibre si ce n'est pas toutes.

L'intérêt de ce modèle est son apport théorique. Il propose un nouveau type de modèle d'occupation des sols fondé sur la théorie du " *bid choice* " qui combine deux approches : la théorie des enchères à la Alonso et l'approche de l'utilité aléatoire. 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.

Figure 4 : l'architecture du modèle *MUSSA*

C'est un modèle intégré de localisation et de transport à cinq étapes. Il est composé de deux sous modules :

- ✓ un module “*bid choice*” incluant les mécanismes de localisation et de rente, considérant le transport comme un attribut de la fonction de consentement à payer du sol,
- ✓ et un module de transport comportant les quatre étapes classiques du modèle standard.

MUSSA suppose que l'agent prend des décisions de localisation et de transport dans le but de maximiser son utilité ou son profit. Les localisations tiennent compte du niveau d'accessibilité des lieux. La localisation des activités affecte le consentement à payer pour les sols en modifiant les caractéristiques de voisinage de la zone ; celles-ci ont un impact sur les rentes foncières ce qui, en retour, peut modifier les localisations des activités. Elle affecte également la structure de la mesure d'accès à la zone, ce qui modifie ensuite le consentement à payer des sols, puis leur occupation.

L'équilibre spatial intervient lorsque la localisation des activités remplit deux conditions :

- ✓ chaque consommateur se localise à un endroit qui maximise son surplus pour un état donné des prix ;
- ✓ les prix sur le marché du sol sont fixés par la règle de la plus forte enchère.

Les mesures de l'accessibilité permettent de quantifier le surplus économique capté par les usagers du transport, ce qui permet au modèle d'occupation des sols de mesurer les bénéfices du transport.

Les idées et les méthodes développées dans ce modèle sont d'un intérêt considérable et peuvent être applicables à d'autres modèles de type dynamique en faisant des hypothèses sur l'équilibre.

3.2. Les modèles quasi-dynamiques

A l'instar de Simmonds et Bates (1999) cités en début de partie, on peut distinguer parmi les modèles quasi-dynamiques ceux basés sur l'entropie (Wilson, 1970 ; *LILT*, Mackett, 1979 ; *DRAM/EMPAL*, Putman, 1995), les *modèles spatiaux-économiques* qui intègrent des modèles économiques indépendants dans un cadre spatial (*MEPLAN*, Echenique et al., 1990 ; *MENTOR*, Echenique et Partners, 1998 ; *TRANUS*, de la Barra, Perez, 1982 ; *METROSIM*, Anas, 1982) et ceux *basés sur les activités* (*DELTA*, DSC, 1994, IRPUD, Wegener, 1983, *URBANSIM*, Waddel, 2000).

Nous nous intéresserons ici plus particulièrement aux modèles spatiaux-économiques et aux modèles basés sur les activités qui ont été à l'origine d'avancées d'une portée considérable dans l'approche des modèles intégrés de transport et d'urbanisation. Toutefois, une présentation du modèle *DRAM /EMPAL* basé sur l'entropie nous apparaît utile étant donnée ses multiples applications aux Etats-Unis. La section suivante décrit l'apport de chacun des modèles, leur origine, leur intérêt, leur structure et leurs limites.

3.2.1. Les modèles basés sur l'entropie

Le modèle DRAM / EMPAL

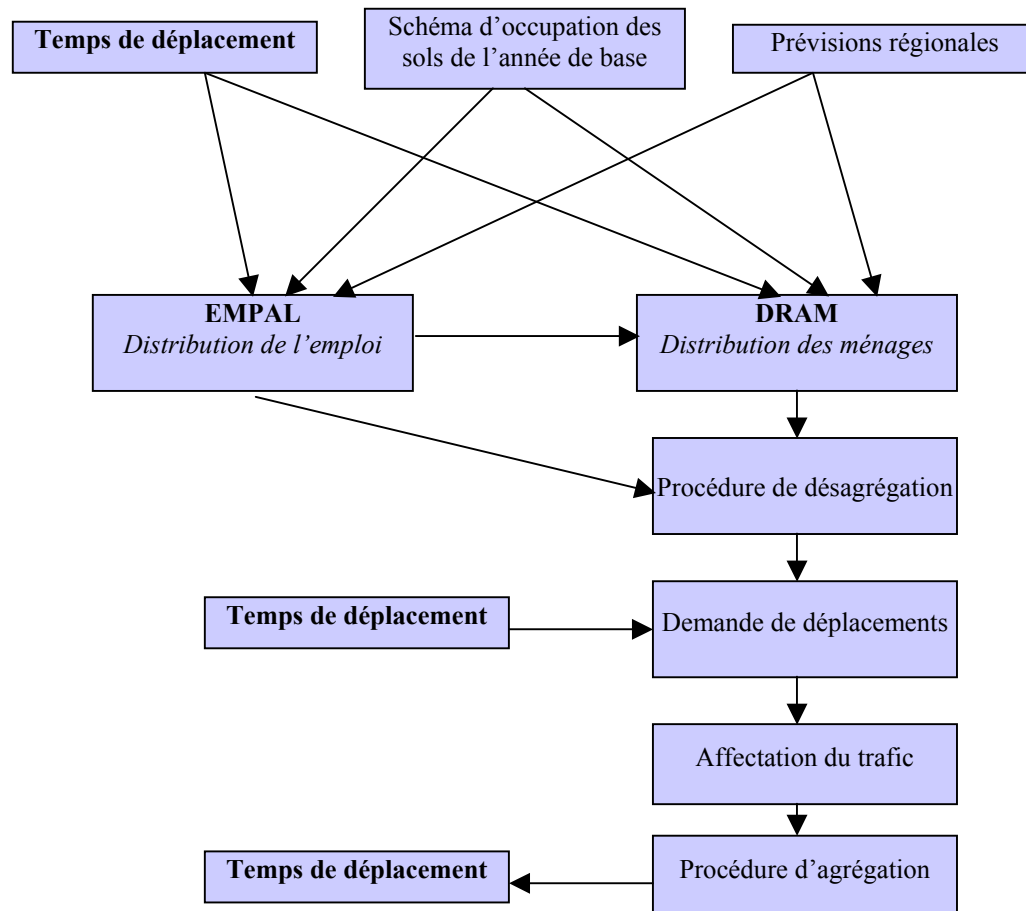
Le modèle *DRAM / EMPAL* développé par Putman (1995) est un modèle d'interaction spatiale fondé sur la théorie de l'entropie. Il fut le modèle d'occupation des sols le plus appliqué aux Etats-Unis au début des années 90.

Ce modèle a contribué à analyser l'impact de l'amélioration des transports et des politiques sur la formation de la ville, tel que la localisation de la population et des emplois.

La figure 5 présente l'architecture du modèle :

- ✓ Le module *DRAM* est un modèle résidentiel contraint qui prévoit la localisation des ménages en réponse aux futures localisations des emplois ainsi que la probabilité des déplacements domicile - travail entre les zones.
- ✓ Le module *EMPAL* est également un modèle contraint qui alloue la prévision de l'emploi exogène en utilisant une mesure d'attractivité de la zone (main-d'œuvre) et le niveau d'emploi préexistant dans chaque zone. La classification de l'emploi et des ménages est plutôt agrégée : elle n'excède pas plus de huit secteurs.

DRAM et *EMPAL* se réitèrent jusqu'à ce que l'équilibre soit atteint.

Figure 5 : architecture du modèle DRAM / EMPAL

Source : Putman, 1995

DRAM/EMPAL est le modèle le plus largement utilisé aux Etats-Unis mais il nécessite un temps d'utilisation et d'expertise considérable. Il est basé sur un modèle gravitaire à la Lowry destiné à servir de base de prévision et à évaluer l'impact des changements brut de l'accessibilité sur l'occupation des sols. Des versions modifiées furent développées sous le nom de METROPILUS, modèle intégré dans un environnement de système d'information géographique.

Ce modèle présente, cependant, de nombreuses limites qui posent le problème de la précision de ce type d'analyse. « *Bien qu'une variété de méthodes a été développée pour utiliser DRAM/EMPAL pour les analyses politiques, aucune d'entre elles n'est vraiment satisfaisante* » (Brinckerhoff, 1998):

- ✓ Les capacités des modèles DRAM/EMPAL, en évaluant les modèles d'interaction entre transport et urbanisation sont rarement pleinement exploités dans la pratique. Le temps et le coût d'exécution des modèles de demande de transport sont excessifs, et par conséquent souvent une seule itération est exécutée. Cependant, Parson et Brinckeroff (1999) recommandent d'itérer jusqu'à ce que les résultats des modèles de transport et d'urbanisation convergent. Autrement, les résultats risquent de ne pas être cohérents.
- ✓ Ces modèles requièrent des ressources et des manipulations lourdes. Il est recommandé de simplifier les modèles d'occupation des sols dans le but d'améliorer les logiciels et pas nécessairement les données.
- ✓ Le modèle DRAM tend à simplifier la connexion complexe qui existe entre l'emploi et les ménages, ce qui l'éloigne de la réalité.

- ✓ Les principales caractéristiques des ménages et de la démographie sont omises, telles que la structure du ménage (enfant, cycle de vie, nationalité, etc.), c'est-à-dire tout ce qui affecte de façon significative les choix de localisation et de transport. Bien que des tests de désagrégation aient été effectués, cela n'a apparemment pas conduit à une amélioration substantielle des prévisions. Ceci laisse à penser que le problème est davantage du à la construction du modèle plutôt qu'à la non significativité de ces facteurs dans la localisation résidentielle.
- ✓ Le marché foncier n'est pas représenté ; les effets sur le prix du sol des changements dans les services ou les politiques de transport ne peuvent pas être estimés. Sans une représentation du marché, il est difficile de capturer les aspects clés du processus de développement urbain, ou bien de tester les nombreuses politiques publiques qui ont un impact sur le prix foncier et le développement. Il ne serait pas raisonnable de tenter d'améliorer les modèles sur ce point dans la mesure où la formulation de base de ces modèles est incohérente avec les modèles qui incorporent le comportement du marché foncier.
- ✓ Les structures ne sont pas prises en compte séparément des activités qui les occupent. Les espaces de logement et de commerce ne sont pas endogènes au modèle, ce qui rend les modèles moins transparents dans leurs comportements que ceux qui prennent en compte la structure du sol, des activités et des relations entre elles en incluant le prix.
- ✓ Le modèle ne permet pas de considérer les effets de contiguïté ou de débordements tels que ceux qui pourraient être engendrés par le développement résidentiel d'une zone sur une autre qui lui serait adjacente (DRAM), ou les effets d'agglomération à travers des zones adjacentes tels que ceux qui apparaissent lors du développement d'un centre d'emploi (EMPAL). Il est possible de tester de tels effets dans la structure du modèle courant mais il est fort probable que des modèles alternatifs tels que les modèles logit imbriqués de choix de localisation sont mieux appropriés.
- ✓ Dans la pratique, il y a une incohérence entre le système zonal utilisé par DRAM/EMPAL et celui utilisé pour la modélisation du transport. Ceci a conduit à l'utilisation de techniques d'allocation pour désagréger les prévisions d'occupation des sols aux zones de trafic ainsi qu'à des techniques d'agrégation pour extraire la matrice des temps de transport générée par les modèles de transports pour l'utiliser dans les modèles d'urbanisation. Cette incohérence peut causer non seulement des pertes d'information dans les modèles d'interaction mais peut également affecter la précision des prévisions. Par conséquent, lorsque cela est possible, il faut désagréger le système zonal utilisé dans les modèles d'occupation du sol au niveau de celui des modèles de transport.
- ✓ Putman et d'autres stipulent que les modèles ne fonctionnent pas bien sur des zones fortement désagrégées ou bien lorsque l'activité est éparse.
- ✓ Les modèles sont statiques (« *cross-section* ») et ne reflètent donc pas réellement le fait que seulement une fraction des ménages et des actifs se déplacent dans une période de temps donnée et que les marchés foncier et immobilier peuvent ne jamais atteindre l'équilibre mais s'ajustent continuellement vers un équilibre. Le développement urbain est un processus incrémental dans lequel les changements apparaissent à la marge, basé sur l'existence de la distribution des activités, des infrastructures, du logement et de l'espace non résidentiel.
- ✓ Il est possible que ces modèles ne puissent pas estimer la sensibilité du système d'occupation du sol aux changements survenus dans les transports si des facteurs d'attractivité importants sont omis.

3.2.2. Les modèles spatiaux-économiques

Les modèles spatiaux-économiques cherchent à inscrire les phénomènes socio-économiques dans leur dimension spatiale. Leur structure est cohérente avec les standards de l'économie traditionnelle dans la mesure où ils s'attachent à représenter pleinement les mécanismes économiques théoriques du marché afin d'aboutir à l'équilibre entre offre et demande à la fois pour les comportements d'usage des sols et pour les transports.

Trois grands modèles sont représentatifs de cette famille, que nous reprendrons ici en guise d'illustration : les modèles *MEPLAN* (1990), *TRANUS* (1982) et *METROSIM* (1982).

a) Le modèle *MEPLAN*

Ce modèle développé par Echenique et al. (1990) est souvent associé au modèle *TRANUS* (de la Barra, 1989) en raison de leurs similitudes. Tous deux représentent un exemple clé des modèles d'interaction- localisation.

Les interactions (échanges économiques) entre les activités sont déterminées par une analyse input-output et sont utilisées pour en extraire la demande de transport. Les choix de localisation, de mode de transport et de répartition sont déterminés à partir d'une structure de choix multi-niveaux basée sur l'utilité aléatoire. Les comportements de localisation des ménages et des entreprises sont basés sur la compétitivité des marchés, au sein desquels les revenus et les loyers sont déterminés de façon endogène à chaque période de temps.

MEPLAN a été utilisé dans les études de planification à toutes les échelles spatiales (villages à Santiago du Chili, villes telles que San Sebastian, aires métropolitaines : Londres, modèles régionaux, modèles internationaux : tunnel sous la Manche). Dans la plupart de ces études, le modèle complet d'interaction entre transport et urbanisation a été utilisé. Seules quelques études ont utilisé uniquement le modèle de transport ou d'autres ont combiné le système d'usage du sol avec un autre modèle de transport.

MEPLAN diffère des modèles de transport conventionnels sur deux principaux aspects :

- ✓ d'une part, plus qu'un modèle au sens conventionnel du terme, *MEPLAN* constitue plutôt une plate-forme générique de modélisation qui fournit les moyens à un utilisateur de développer son modèle sur n'importe quelle étude spécifique.
- ✓ d'autre part, le modèle de transport est pleinement intégré avec un modèle d'usage du sol ou d'économie régionale. Par conséquent, la représentation des étapes de génération et de distribution des déplacements diffère de celle utilisée dans les modèles standard à quatre étapes. Ces deux étapes sont intégrées dans un modèle d'usage du sol (ou d'économie régionale) dans le but d'améliorer la précision des demandes de déplacements estimées et leurs réactions par rapport aux politiques de transport.

L'interrelation entre transport et configuration de l'activité économique est le cœur de la logique de la modélisation proposée par *MEPLAN*. Trois hypothèses clés sont posées:

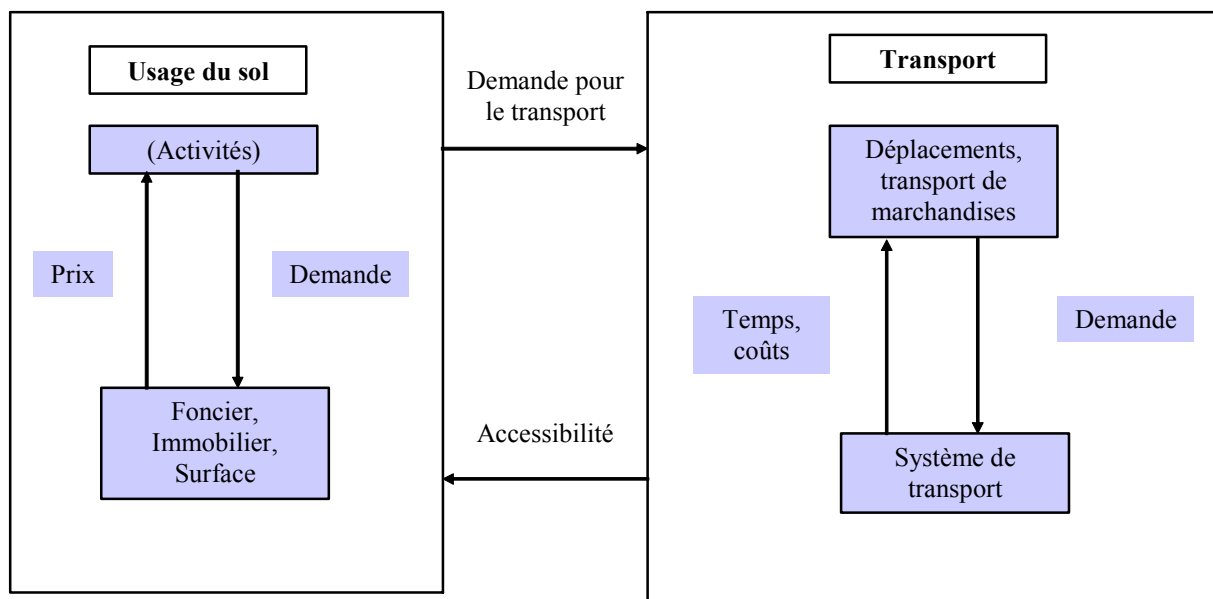
- ✓ le transport est une demande dérivée résultant des interactions économiques entre les activités. Par exemple le transport de biens, de services et de travail des lieux de production aux lieux de consommation.
- ✓ le transport influence la localisation des activités à travers le temps. Par conséquent, les modifications des transports génèrent des lieux plus accessibles aux marchés augmentant ainsi la demande pour les produits, les services et le travail produits à ces endroits.

- ✓ le transport et l'usage du sol sont traités comme des marchés où l'interaction entre l'offre et la demande établit le prix du transport et du sol.

Ces hypothèses structurent la modélisation qui se dessine selon la théorie suivante :

- ✓ les interactions entre les activités sont déterminées par une analyse entrée-sortie ;
- ✓ les choix de localisation, de mode de transport et d'affectation sont déterminés par des modèles d'utilité aléatoire de choix discrets ;
- ✓ les restrictions de capacité sur les marchés du sol et du transport altèrent les prix et donc affectent les utilités des agents (ménages, entreprises).

Figure 6 : l'architecture du modèle MEPLAN



Dans la pratique, cette structure théorique est représentée dans *MEPLAN* par quatre modules inter reliés au sein desquels on retrouve les quatre étapes d'un modèle de transport conventionnel (cf. figure ci-dessus) :

- ✓ un module usage du sol (*LUS*) : il modélise la localisation spatiale des activités tel que l'emploi et la population et produit des échanges entre les zones. Il est utilisé pour représenter les liens socio-économiques entre les activités ou l'occupation de l'espace. Il contient l'étape de distribution des déplacements.
- ✓ un module interface (*FRED*) : il convertit les matrices d'échanges d'usage du sol de *LUS* en matrices de flux de transport ainsi que les désutilités de déplacement estimées par *TAS* (le module transport, voir ci-après) en désutilités ou accessibilité pour le module *LUS*. Il contient l'étape génération des déplacements.
- ✓ un module transport (*TAS*) : il assigne les matrices de flux aux différents modes de transport et d'itinéraires. Il contient les étapes de répartition modale et d'affectation.
- ✓ un module d'évaluation (*EVAL*) : il représente à la fois les bénéfices de transport et d'usage du sol. Il produit des indices sur la performance du système tels que la vitesse moyenne, la consommation d'énergie, la pollution émise, la distribution des bénéfices par groupes socio-économiques, etc.

Ces modules fonctionnent par périodes de temps basées sur des rétroactions entre transport et usage du sol prenant place d'une période de temps à la suivante. Ils opèrent par étapes de cinq ans vers une année horizon de prévision.

Le cœur du système est le modèle input-output qui prédit les changements de la demande pour l'espace. Celui-ci est basé sur l'idée que la production de l'activité économique (l'output) consomme d'autres types d'activité comme input. Dans le processus de production, ces inputs consomment à leur tour d'autres inputs et ainsi de suite. Pour conduire ce mécanisme, *MEPLAN* se base sur la séparation de l'emploi entre un élément exogène et un élément endogène. L'emploi exogène représente les secteurs économiques produisant essentiellement pour l'export en dehors de l'aire d'étude et dont le choix de localisation n'est pas déterminé par le besoin d'accéder à un marché local, comme cela est le cas pour le secteur primaire.

Le modèle de consommation est élastique : il permet de consommer des biens, des services et de l'espace variant avec les prix et le revenu.

Le modèle de choix spatial prédit la localisation des activités telles que les ménages et l'emploi. Il estime pour chaque ménage et emploi de service, les échanges de la zone de production à la zone de consommation et la quantité qui est produite dans chaque zone. Ceci se fait par l'intermédiaire d'un modèle logit de choix discret qui, pour une zone de consommation donnée estime la proportion de la demande qui sera transportée de chaque zone de production. Par exemple, le nombre de ménages d'un groupe socio-économique particulier qui est alloué dans une zone résidentielle est gouverné par : le coût de la vie dans cette zone (foncier, etc.) ; la quantité de surface que le ménage va consommer (fonction de la rente et du revenu du ménage); la quantité de surface résidentielle dans cette zone ; l'accessibilité aux opportunités d'emplois pour les ménages (coût et temps de transport) ; l'accessibilité aux commerces ; l'attractivité intrinsèque de cette zone pour ce groupe socio-économique.

Les résultats de cette matrice d'échange sont envoyés au *module interface* où ils sont convertis en matrices de déplacement pour entrer dans le modèle de transport.

Enfin, une nouvelle boucle s'amorce avec le *processus d'allocation spatiale* qui reprend la demande exprimée pour chaque activité dans une zone donnée et distribue l'offre de cette demande parmi l'offre dans les zones de production. Le processus d'allocation lui-même est basé sur le coût de la vie dans cette zone, la disponibilité du sol et le coût de se déplacer entre les zones de production et de consommation, précédemment calculé dans le modèle de transport.

Cet outil de modélisation est compatible avec des logiciels standard tels que le tableur Excel, Map-Info ou Access.

Echenique et Partners ont développé un nouveau modèle *MENTOR* (1998) d'occupation de l'espace pouvant présenter une interface transport. Il est construit sur la même structure théorique que *MEPLAN* mais fonctionne à un niveau plus détaillé de segmentation de l'activité : *MENTOR* divise les ménages en 30 catégories (CSP du chef de ménage, possession d'une automobile, nombre d'adultes, inactifs, retraités, etc.). De plus, son utilisation est beaucoup plus simple grâce notamment à sa fonction S.I.G.

Le modèle *MENTOR* est actuellement dans sa première phase d'application dans le comté de Cambridge. Il intègre une interface de transport existante - le modèle *SATURN* pour la ville de Cambridge et ses alentours- et explore les problèmes que vont susciter dans un futur proche la rapide expansion de la population et de l'emploi dans une aire souffrant déjà de la congestion de son réseau de transport.

Le principal avantage de ce type d'approche est qu'elle peut fournir une analyse coût-bénéfice de plein rang des politiques d'usage du sol, et non pas seulement des effets des politiques de transport isolément.

Les deux modèles diffèrent par les façons et les situations dans lesquelles ils sont utilisés mais non pas dans leurs hypothèses sous-jacentes telles que par exemple : comment quantifier au mieux les choix de transport et de localisation des firmes et des ménages ?

Les principales caractéristiques de *MENTOR* sont les suivantes :

- ✓ le modèle d'occupation du sol doit être structuré afin d'être lié aux modèles de transport déjà utilisés par les autorités locales. Il doit se focaliser sur les aspects non couverts par les modèles de transport existant et leur être complémentaire (au lieu de les concurrencer).
- ✓ il faut qu'il se focalise principalement sur les points faibles des systèmes courants ; les relations entre modification de l'occupation de l'espace et les caractéristiques des transports.
- ✓ l'augmentation de la longueur moyenne des déplacements a été le déterminant majeur de la croissance de la demande pour les transports en Grande-Bretagne. Afin de modéliser cela de façon réaliste, il est nécessaire de représenter les demandes de transport qui distinguent explicitement les effets des objectifs des déplacements, les types de voyageurs.

b) Le modèle TRANUS

TRANUS (de la Barra, Perez, 1982) est un modèle intégré qui peut être appliqué à l'échelle urbaine ou régionale. Il a deux objectifs :

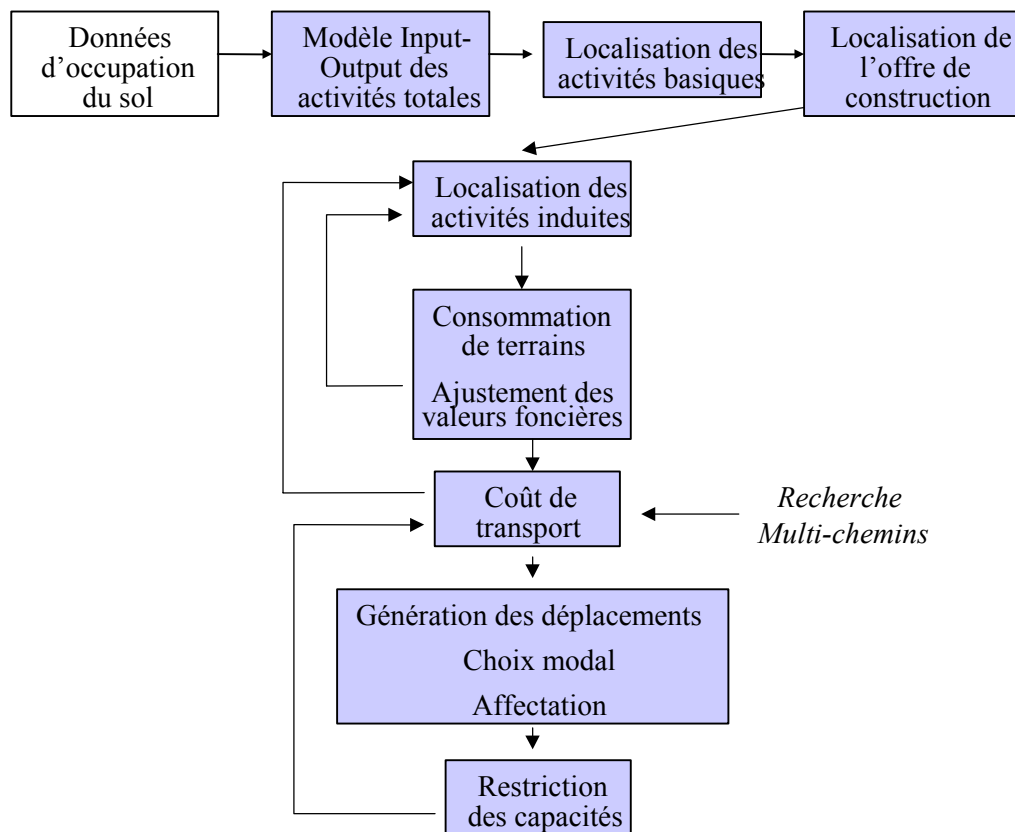
- ✓ simuler les effets probables des politiques d'urbanisation et des projets de transport ;
- ✓ évaluer ces effets à un niveau social, économique et financier.

Le modèle intègre plusieurs techniques de modélisation et fondements théoriques : la théorie de la base, les techniques des modèles comptables 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. C'est 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.

Le modèle est composé de deux parties distinctes qui interviennent successivement et que l'on retrouve de manière décomposée dans la figure ci-dessous.

- ✓ la partie usage du sol : les acteurs économiques de l'agglomération se localisent de manière à utiliser 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 résulte 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.
- ✓ la partie transport : les matrices Origine-Destination ainsi générées sont affectées sur le réseau. Pour chaque couple Origine-Destination, une désutilité de transport est calculée prenant en compte les coûts généralisés sur chaque arc et pour chaque mode. Cette désutilité du transport est ensuite prise en compte dans la stratégie de localisation des acteurs dans la partie usage du sol de la séquence suivante.

Figure 7 : l'architecture du modèle TRANUS



Le modèle est pseudo-dynamique et il donne 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. Ainsi, le module 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 d'une zone à une autre des différents secteurs socio-économiques. Dans le modèle de transport, les matrices des flux fonctionnels sont transformées en matrices de déplacements grâce au modèle de génération des déplacements. Les flux fonctionnels déterminent donc la demande de déplacement pour chaque paire Origine-Destination et suppose que cette transformation soit immédiate. Ainsi les schémas d'activité d'une période déterminent la demande de transport de cette même période. 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.

On trouve de nombreuses applications en Amérique Latine aussi bien pour évaluer des politiques d'urbanisation (Willemstad, 1981 : évaluer un projet de développement urbain), que des politiques de transport (Caracas, 1981 : évaluer l'opportunité de l'extension d'une ligne de métro) ou des scénarios de consommation d'énergie en relation avec des politiques d'urbanisation et de transport. En Europe, il est mis en œuvre dans plusieurs agglomérations comme Bruxelles (modèle *ESTEEM*, qui dérive directement de *TRANUS*) et Inverness en Écosse. Sa tentative de mise en œuvre sur l'agglomération lyonnaise, bien que n'ayant pas donné entière satisfaction, a été tout de même jugée intéressante par le CERTU.

c) Le modèle METROSIM

Ce modèle est le résultat de nombreux travaux conduits par Anas depuis 1982 sur l'étude des relations entre les marchés de localisation résidentielle et le transport urbain. Ses travaux se sont plus particulièrement focalisés sur la manière de profiter des avantages théoriques procurés par les modèles d'utilité aléatoire de choix discret pour les intégrer dans la représentation micro-économique d'un marché de localisation résidentielle. Cette approche probabiliste de choix discret a amélioré l'approche initiale d'Alonso basée sur une " fonction d'enchère " en modélisant de façon explicite la dispersion des préférences au sein de la population et en écartant l'hypothèse trop simplificatrice selon laquelle tous les ménages ont les mêmes goûts et les mêmes caractéristiques.

METROSIM est destiné à tester les politiques de transport et d'occupation de l'espace. Il contient une procédure d'analyse coût-bénéfice qui mesure deux types de bénéfices :

- ✓ les variations d'utilité que les ménages retirent des accessibilités urbaines, et qui sont déterminées conjointement par les changements dans les transports et l'usage du sol.
- ✓ les changements dans les valeurs de l'immobilier.

Sa structure théorique a été améliorée par une série de modèles opérationnels du marché du logement et du transport à Chicago (*CATLAS*), San Diego (*CPHMM*) et New-York (*NYSIM*) depuis le début des années 80. Le dernier produit de ces développements est le modèle *METROSIM* qui estime les effets interdépendants des systèmes de transport et d'occupation des sols au niveau d'une aire métropolitaine américaine. Une personnalisation de ce modèle a été développée pour la région métropolitaine de New-York (*NYMTC-LUM*) comprenant le modèle d'occupation de l'espace de *METROSIM* lié au modèle de transport déjà existant, *MTC*. Ce dernier estime les choix et la répartition des modes et fournit les utilités de transport requises dans le modèle d'occupation de l'espace.

La structure de *METROSIM* est basée sur une série de relations économiques représentant les décisions de localisation et de déplacement des ménages, des actifs, des promoteurs, des propriétaires et autres acteurs économiques. Ces décisions sont soumises aux variables telles que le revenu, la rente, la valeur des logements, les temps de transports, le coût des biens et des services. Ainsi, dans la pratique, la mise en œuvre du modèle consiste à enchaîner l'exécution de sept modules :

- ✓ *l'industrie basique* : le modèle prend la production de chaque zone donnée de façon exogène et détermine de façon endogène la demande de travail, l'utilisation de la surface, les besoins de l'industrie de base en sol, les salaires et le niveau de la rente.
- ✓ *l'industrie non basique* : ceci procède de la même façon que précédemment excepté que le schéma de localisation est déterminé de façon endogène.
- ✓ *la propriété* : elle représente les marchés de la propriété résidentielle et du commerce séparément. Elle détermine la quantité de construction et de démolition des unités résidentielles, aussi bien que les espaces vacants et les valeurs des marchés et de la rente dans chaque zone.
- ✓ *les espaces vacants* : ce module détermine la quantité et la valeur de marché de l'espace vacant disponible pour le développement dans chaque zone.
- ✓ *les ménages* : c'est ici que se trouve déterminée la distribution des ménages résidents dans chaque zone par type d'unité résidentielle (individuel ou collectif), par lieu d'emploi, revenu du ménage et mode de transport- travail du chef de famille.
- ✓ *les déplacements* : ils sont de deux sortes : domicile-travail et domicile-autres motifs. La matrice de demande des déplacements travail est calculée à partir d'un modèle unifié de localisation résidentielle, de choix d'emploi et de mode. Pour les autres motifs de

déplacement, on calcule les fréquences des trajets et les configurations des déplacements par mode pour chaque destination. Ces nouveaux schémas influencent à leur tour la localisation des industries non- basiques.

- ✓ *la répartition du trafic* : les matrices de déplacements automobile sont affectées sur le réseau routier et les temps de parcours sont mis à jour pour tenir compte de la congestion.

Il est à noter que *METROSIM* produit un état d'équilibre à long terme de la configuration spatiale et des déplacements. En ce sens, c'est donc un modèle statique. Cependant, ce modèle est capable d'opérer sur plusieurs périodes (annuellement) et produire ainsi des changements annuels " d'une situation existante convergente jusqu'à atteindre un état stable". Par conséquent, il peut être considéré comme un modèle quasi-dynamique.

Ce modèle diffère des deux modèles présentés précédemment car il adopte une segmentation moins détaillée des différents acteurs et des activités qu'il modélise. Toutefois, de nombreuses similitudes apparaissent entre les modèles *MEPLAN/TRANUS* et *METROSIM*, notamment dans leurs structures mathématiques sous-jacentes et dans la façon de représenter les marchés et de déterminer les prix de façon endogène. Cependant, l'échelle de segmentation limitée disponible dans *METROSIM* peut avoir un impact sur sa capacité à refléter pleinement la complexité des marchés en opération dans les villes.

Par ailleurs, *METROSIM* n'a été appliqué qu'aux États-Unis. L'adapter au contexte de la ville européenne risque demander des efforts considérables.

3.2.3. Les modèles basés sur l'activité

L'approche des modèles basés sur l'activité se focalise sur les différents processus de changement qui affectent les activités et les espaces qu'elles occupent. Ces modèles se caractérisent par une segmentation plus détaillée de l'activité et un traitement plus élaboré des décisions de déplacement et des choix de localisation. Contrairement à d'autres modèles, ils ne relocalisent pas toutes les activités à une période de temps donnée mais ils séparent les décisions de déplacement (qui affecteront seulement une part des activités totales) et la recherche d'une nouvelle localisation. En outre, ces modèles représentent les changements démographiques de façon plus détaillée.

Le modèle URBANSIM

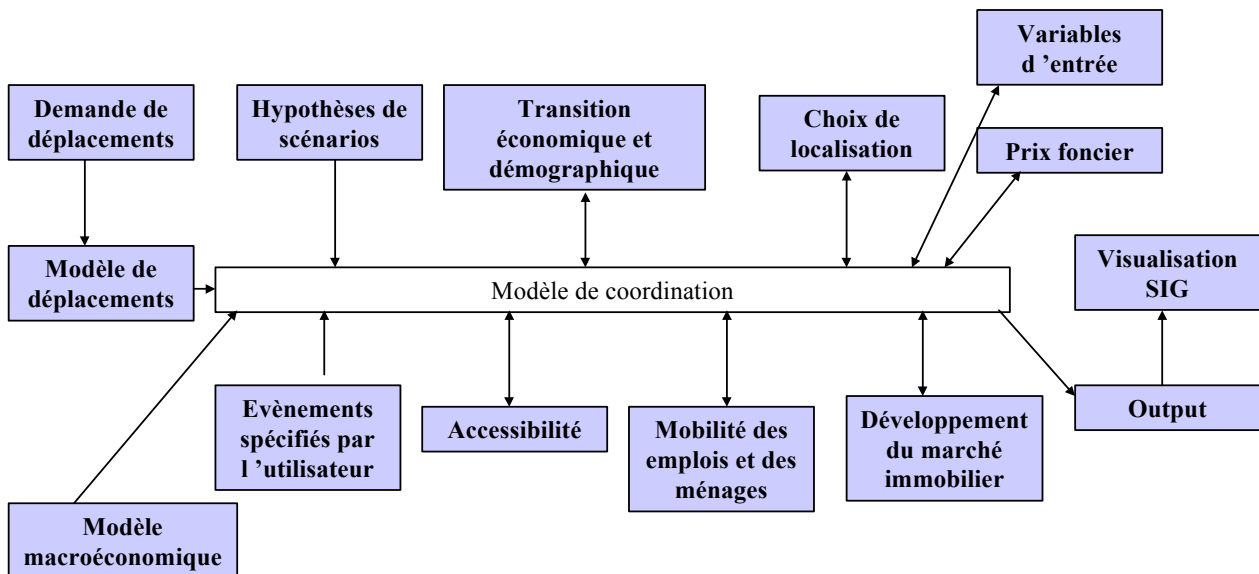
Ce modèle a été développé aux États-Unis dans le but de répondre au besoin intense des gouvernements fédéraux de lier la planification de l'occupation de l'espace aux transports et à l'environnement, mais également pour contrôler les effets de la croissance tels que l'étalement urbain, la congestion, le logement, etc. Les modèles de planification des organisations métropolitaines de planification, n'étaient pas destinés à répondre à ces questions. *URBANSIM* a été créé et développé sur l'aire métropolitaine de Eugene-Springfield pour y remédier (Waddel, 1994).

URBANSIM est un modèle de choix discret qui se base sur la théorie de la maximisation de l'utilité aléatoire. Sa structure désagrégée et basée sur l'estimation des changements sur de courtes périodes de temps se rapproche du modèle *CUF-2* (Landis et Zhang, 1998) mais, contrairement à ce dernier, il détermine le marché de la demande immobilière à chaque localisation ainsi que les acteurs et les

processus de choix qui influencent la configuration de l'espace urbain et le prix sur le marché immobilier.

Il est composé de plusieurs modules reflétant les choix clés des ménages, des actifs, des promoteurs et des gouvernements (comme input politique) et qui interagissent sur le marché immobilier. Ainsi, en adoptant une approche comportementale, le modèle fournit une structure théorique plus transparente pour les utilisateurs, leur permettant d'incorporer explicitement des politiques et d'évaluer leurs effets.

Figure 8: l'architecture de URBANSIM



Comme le symbolise le schéma ci-dessus, plus qu'un simple modèle, *URBANSIM* constitue une plate-forme qui peut être décrite comme un système de simulation urbaine (Wadell, 1994) :

- ✓ Un *modèle de transition démographique* simule les changements dans la population et un ajustement proportionnel itératif est utilisé pour déterminer combien de ménages de chaque type vont se créer ou disparaître. Un *modèle économique de transition* fait de même dans le secteur des emplois.
- ✓ Un *modèle de mobilité des emplois et des ménages* simule les décisions de déménagement et de relocalisation des ménages et des emplois. Les probabilités de mouvement sont basées sur des données historiques. Un modèle logit multinomial est alors utilisé pour allouer les ménages et les emplois mobiles aux nouveaux lieux d'emploi et de résidence. Les variables utilisées dans le modèle de choix de localisation des ménages comprend des attributs de logement dans la parcelle (prix, densité, âge), des caractéristiques de voisinage (densité, accessibilité aux services, valeurs foncières moyennes, etc.) et l'accessibilité régionale aux emplois. Le modèle de localisation des emplois contient des variables de caractéristique du marché immobilier dans la parcelle (prix, densité, âge, type d'espace), de voisinage (valeur foncière moyenne, niveau d'emploi dans les autres secteurs, etc.) et l'accessibilité régionale à la population.
- ✓ Un *modèle de développement du marché immobilier* simule les choix des promoteurs sur le type de construction à entreprendre et l'endroit, sur le plan d'un nouveau développement ou d'un développement de structures déjà existantes. Pour cela un modèle logit multinomial est utilisé. Les variables contiennent les caractéristiques de la zone (développement en cours, contraintes politiques, amélioration de la valeur foncière), les caractéristiques de la

- localisation du site (proximité d'une autoroute, d'une grande voie de communication, développements existants et récents) et l'accessibilité régionale à la population.
- ✓ Un *modèle de prix foncier* simule les prix du sol de chaque zone d'étude en suivant les changements des caractéristiques des localisations au cours du temps. Il est établi sur la théorie économique urbaine, qui considère que la valeur de la localisation est capitalisée dans le prix du sol. Le modèle est calibré à partir de données historiques et utilise une régression des prix hédoniques permettant d'évaluer les effets de la zone, du voisinage, de l'accessibilité et des politiques de planification sur le prix du sol. Il permet également d'incorporer les effets des fluctuations locales et régionales de court terme sur l'ensemble des prix du sol.
 - ✓ Enfin, l'accessibilité est mesurée à partir d'un *modèle de transport externe* (initialement calibré sur un modèle à quatre étapes) qui peut être exécuté par période de cinq ans dans la simulation ou lorsque survient un changement majeur dans le système de transport. Cependant, *URBANSIM* fonctionne annuellement mettant ainsi à jour les valeurs de l'accessibilité basées sur le schéma de développement spatial des activités.

Ce modèle permet aux utilisateurs de spécifier des politiques (input, hypothèses), de générer et de comparer des scénarios. Ces derniers consistent à combiner des politiques de développement représentées par des données d'inputs appropriées tels que les plans d'infrastructure ou encore les contraintes de développement dans les zones sensibles à l'environnement. Ces politiques sont liées et s'appliquent à l'échelle du quartier, de la commune ou de l'agglomération urbaine. Le terme "scénario" dans ce modèle signifie un ensemble d'hypothèses sur les politiques de planification urbaine qui peuvent rentrer dans le modèle et être analysées selon les conséquences qu'elles engendrent sur les résultats comme la forme urbaine, la densité, la configuration des déplacements, etc.

Depuis l'expérience initiale à Eugene-Springfield, *URBANSIM* s'est largement répandu (Waddell, 2005). Au États-Unis, il est aujourd'hui appliqué dans 5 régions urbaines (Eugene-Springfield, Honolulu, Houston, Wasatch Front dans l'Utah et Puget Sound dans l'état de Washington) et est en cours de développement dans 5 autres (Denver, Detroit, Phoenix, El Paso, San Antonio). Il est également en phase d'implantation en Europe à Amsterdam, Zürich et Paris – nous aurons l'occasion d'y revenir plus loin.

3.3. Les nouvelles modélisations des interactions entre transport et urbanisme

Parmi les modèles de transport et d'urbanisme, nous venons de le voir, différentes variantes existent en ce qui concerne la structure d'ensemble, les bases théoriques, les techniques de modélisation, les données requises, etc. Cependant, l'approche agrégée qui est développée marque parfois certaines faiblesses pour représenter les comportements individuels d'adaptation aux politiques et aux changements envisagés. De même, les impacts locaux fins des activités et des transports sont souvent mal appréhendés. Plusieurs techniques, permises aujourd'hui par l'accroissement des performances de calcul des ordinateurs, tentent de dépasser ces limites et de rendre possible la reproduction spatiale complexe des comportements des individus. Nous évoquerons notamment ici la micro-simulation, les modèles d'automates cellulaires ou les modèles multi-agents.

Même si, dans le cadre de *SIMBAD*, l'utilisation de ce type d'outils plus innovants mais plus risqués en terme d'applicabilité n'a pas été envisagée (l'objectif de ce projet n'est pas de développer de nouvelles méthodes en matière de modélisation), il apparaissait intéressant de faire une rapide présentation de leurs développements actuels et des enjeux qu'ils soulèvent en terme de recherche.

3.3.1. Les modèles de micro-simulations basées sur l'activité

Aujourd'hui, la modélisation urbaine est confrontée à de nouvelles problématiques en raison des questions de développement durable, de développement des nouvelles technologies et des politiques d'aménagement. Les modèles doivent donc être capables de prendre en considération non seulement les impacts économiques mais également les impacts environnementaux des politiques de transport et d'aménagement urbain. Cependant les systèmes *LUTI* existant apparaissent souvent trop agrégés pour répondre à ces nombreux challenges. Les modèles classiques ne distinguent que quelques entreprises, groupes socio-économiques et catégories de logements. De plus, la plupart d'entre eux reposent sur un système zonal dans lequel il est supposé que tous les attributs sont uniformément distribués à travers une zone. Les interactions spatiales entre les zones sont établies par l'intermédiaire de réseaux de transport reliés uniquement aux centroïdes des zones. Enfin, ils ignorent que les activités socio-économiques et leurs impacts environnementaux sont continus dans l'espace.

Ce constat débouche sur une nouvelle conception des modèles urbains, basée sur un point de vue microscopique du changement urbain. De façon basique, on va chercher à reproduire un processus observé à un niveau "macro" par la modélisation de plusieurs processus "micro". Les comportements humains sont directement modélisés au niveau individuel en représentant la façon dont chaque individu choisit entre plusieurs options, suivant ses perceptions propres, ses préférences et ses habitudes sous contrainte d'incertitude, de manque d'information et des limites de temps et d'argent.

Trois sortes de processus peuvent être distingués dans les modèles de micro-simulation (Wegener et al. 1986) :

- ✓ Les choix, parmi plusieurs alternatives.
- ✓ Les transitions, définies comme un changement d'un état à un autre.
- ✓ Les politiques, *i.e* les leviers par lesquels l'autorité publique intervient dans le processus de développement urbain.

Le développement méthodologique sous-jacent renvoie au modèle logit multinomial. Cette approche consiste à générer une distribution de probabilités en donnant une vraisemblance plus élevée aux alternatives les plus attractives. Elle permet de simuler les décisions entre plusieurs options : lorsque l'attractivité augmente, la probabilité de sélectionner cette alternative augmente exponentiellement.

Alors que les premières expériences remontent aux années soixante, ce n'est que récemment que la micro-simulation a retrouvé un intérêt. Les modèles de transport désagrégés constituent probablement l'aire d'application la plus avancée. Ils reproduisent les comportements spatiaux par lesquels les individus choisissent entre les options de mobilité dans leur poursuite d'activités durant la journée. Des modèles de transport basés sur l'activité sont désormais en développement dans plusieurs pays et sont généralement considérés comme les modèles de transport du futur.

Aujourd'hui il existe plusieurs modèles de micro-simulation en Amérique du Nord tels que *CUF* ou *ILUTE* (*Integrated Land Use and Transportation Environment*, Canada, 1998) ; la souplesse de certains modèles plus classique leur permet également d'expérimenter ces outils (*URBANSIM* et *TLUMIP*). En Europe, on trouve également quelques projets nationaux tels que *ALBATROSS* de Arentze et Timmermans (2000) ou *ILUMASS*, en développement sur Dortmund et fondé sur le modèle *IRPUD* de Wegener.

3.3.2. Les modèles Automates Cellulaires

Les modèles automates cellulaires se sont développés à partir de 1994 avec les contributions de Batty (1994) et Clarke *et al.* (1999). Ils permettent de simuler le développement urbain.

Un modèle automates cellulaires comprend plusieurs cellules (des morceaux d'espace) spécifiées par un nombre fini d'états particuliers. Chaque changement d'état doit être local et dépendre uniquement des facteurs et des règles caractérisant les cellules voisines (les cellules contiguës). A chaque cellule est associée une probabilité de transition d'un état à un autre. Par exemple, la probabilité pour une cellule rurale de devenir résidentielle.

Plusieurs recherches sont en cours pour prolonger et améliorer les performances de ces modèles, qui sont encore en phase exploratoire et restent pour l'instant développés par des équipes universitaires. Par exemple :

- ✓ La plupart d'entre eux n'intègre pas vraiment de modèle de transport dans le sens où, s'ils supposent qu'il existe un réseau de transport, le flux de trafic n'est pas simulé. Les travaux récents tentent de remédier à cela (Timmermans, 2003)
- ✓ D'autres recherches ont expérimenté des extensions du modèle automates cellulaires en se rapprochant des modèles multi-agents en considérant les cellules comme des agents preneurs de décisions et en essayant d'étendre l'interaction au-delà du voisinage (Batty et Jiang, 1999 ; O'Sullivan et Torrens, 2000).
- ✓ Les travaux actuels de Arentze et Timmermans (2003) permettent de modéliser comment les différents agents concourent pour les mêmes localisations ou bien retirent des avantages de leurs synergies. Ces mêmes chercheurs ont développé un prototype d'un système appelé *ABSOLUTE* reliant un modèle de demande de transport basé sur l'activité à un ensemble de décisions des entreprises comme faisant partie d'un large modèle de décisions et de changements d'usage du sol.

Enfin, avec ce dernier exemple, on voit que l'approche automates cellulaires n'est pas incompatible avec les modèles plus traditionnels que nous avons décrits précédemment. Elle peut au contraire les enrichir pour dépasser certaines de leurs limites, liées à leur approche agrégée. Ainsi par exemple, un modèle connecté comme *URBANSIM* peut intégrer certains aspects de ces développements récents à un niveau fortement désagrégé, basé sur les modèles multi-agents et les automates cellulaires. Cependant, lorsque cela est nécessaire, il peut revenir à un modèle d'échelle macroscopique.

3.3.3. Les modèles Multi-Agents

Les modèles multi-agents sont issus de l'approche automates cellulaires mais s'en différencient par leur prise en compte de la confrontation des règles de décisions des agents. Ils permettent de simuler les interactions sociales complexes entre les agents individuels (Axtell et Epstein, 1996). Ces modèles ont émergé pour répondre à des besoins de représentations très divers, comme des interactions sociales dans *ASCAPE* (Parker, 1998), des processus spatiaux tels que les flux pédestres (Batty et al. 1998) ou des interactions économiques (Tefastion, 2000).

L'évolution de la théorie des jeux annonce de nouveaux travaux permettant d'analyser les interactions des agents sur les marchés sous des hypothèses moins restrictives que l'approche néoclassique des marchés de concurrence pure et parfaite. Elle peut par exemple développer des modèles de marchés d'interactions permettant des variations dans les règles de décision utilisées par

les agents et faire émerger des résultats sur les marchés provenant des expériences en matière de succès et d'échec de ces interactions individuelles.

3.3.4. Le Sketch Planning Model

Il reste à souligner que si les limites constatées dans la mise en œuvre des modèles *LUTI* ont conduit progressivement à une désagrégation de plus en plus grande des zones et des acteurs considérés, les recherches de solutions plus simples, plus légères et moins consommatrices de données restent toujours d'actualité. Nous prendrons ici pour exemple le *Sketch Planning Model*, *PROSPECTS SPM*, développé sur Vienne (Autriche) par Pfaffenbichler en 2003 en alternative aux lourdes procédures des modèles *LUTI*.

L'objectif était, dans le cadre du projet européen *PROSPECTS*, de prendre en compte au sein stratégies de développement urbain à long terme de facteurs importants comme les effets environnementaux, les comportements des promoteurs ou encore les choix technologiques, tout en disposant d'un outil plus simple à construire et plus facile à exécuter qu'un modèle *LUTI* classique.

PROSPECTS SPM apporte ainsi plusieurs simplifications aux modèles d'interaction entre transport et urbanisme. Un réseau abstrait est notamment substitué à la recherche de représentation d'un réseau réel. Ce qui signifie que l'on ne peut plus choisir un itinéraire et que les interactions entre trafic et destinations différentes ne sont pas prises en compte. Les agents (firmes, ménages) caractérisés par des groupes socio-économiques différents sont remplacés par un groupe moyen. L'offre et la demande sur tous les marchés ne sont pas explicitement modélisées. Alors que les marchés des déplacements et du logement sont explicités dans le modèle, ceux du travail ou des autres inputs de production ne le sont pas. De même, les dimensions de choix, telles que la taille du logement par exemple, ne sont pas prises en compte.

Les nouvelles méthodes tentent donc d'apporter des améliorations quant à la conception des modèles *LUTI* et à leur façon de modéliser les processus d'interactions complexes entre le système de transport et l'organisation de la structure urbaine. Elles s'attachent notamment à remédier à leur faible résolution spatiale par le recours aux modèles de micro-simulation, d'automates cellulaires ou de multi-agents. Mais ces méthodes sont encore plus fortement consommatrices de procédures lourdes et le besoin se fait toujours sentir de recherche et développement en matière de modèles stratégiques agrégés, aux structures plus légères, et moins gourmands en données et en puissance de calcul.

3.4. Un tableau de synthèse des différents modèles évoqués

En conclusion de cette partie bilan des modèles d'interactions entre transport et urbanisme, le tableau synoptique ci-dessous, reprend de manière synthétique les différents modèles évoqués précédemment. C'est au sein de c'est ensemble que nous discuterons, dans la partie suivante, du choix du modèle *LUTI* le plus adéquat dans le cadre du projet *SIMBAD*.

Tableau 1 : Les modèles statiques

Modèles	Application	Intégrés/Connectés	Marché foncier/immobilier	Résolution spatiale
DSCMOD Simmonds, 1991	Nombreuses applications en Grande-Bretagne : Edinburgh, Bristol, Merseyside (Liverpool), impacts du tunnel sous la Manche. Egalement utilisé à Dublin et Sao Paulo.	<i>Connectés</i>	<i>Non modélisé.</i> Modèle strictement comparatif : il calcule les changements d'occupation des sols basés sur les changements d'accessibilité entre deux ensembles d'inputs.	<i>Faible résolution spatiale</i>
MUSSA Martinez, 1992	Santiago du Chili	<i>Intégrés</i>	Prise en compte des interactions entre rente foncière et accessibilités	<i>Toute résolution spatiale.</i> <i>S.I.G.</i>

Tableau 2 : Les modèles quasi-dynamiques basés sur l'entropie

Modèles	Application	Intégrés/Connectés	Marché foncier/immobilier	Résolution spatiale
LILT Mackett, 1979, 1983	Leeds.	Connecté	<i>Non modélisé</i> et les prix ne sont pas considérés.	
DRAM/ EMPAL Putman, 1995	Modèle d'occupation du sol le plus appliqué aux Etats-Unis au début des années 90. modèle simplifié de <i>LILT</i> . Version modifiée : <i>METROPILUS</i> intégré dans un environnement de <i>Système d'Information Géographique</i> (S.I.G.).	<i>Connectés</i>	<i>Non représenté</i> . Les effets sur le prix du sol des changements dans les services ou les politiques de transport ne peuvent pas être estimés.	<i>Zones de trafic</i> . Incohérence entre le système zonal du modèle d'urbanisme et celui du modèle de transport.

Tableau 3 : Les modèles quasi-dynamiques spatio-économiques

Modèles	Application	Modèles Intégrés/Connectés	Marché foncier et immobilier	Résolution spatiale
MEPLAN Echenique et al., 1990	Un des modèles les plus utilisés (avec TRANUS). Etudes de planification à toutes les échelles spatiales (San Sebastian, Londres, Tunnel sous la Manche, etc.).	<i>Intégrés</i> Les étapes de génération et de distribution sont calculées dans le module d'urbanisme dans le but d'améliorer la précision des demandes de déplacement estimées et leurs réactions par rapport aux politiques de transport	<i>Représenté.</i> Les prix s'ajustent à l'équilibre de court terme.	Le zonage peut varier entre quelques centaines de mètres et le diamètre d'une commune. Applications à l'échelle communale.
MENTOR Echenique et al., 1998	En première phase d'application dans le comté de Cambridge.	<i>Intégrés</i>	<i>Représenté.</i>	<i>Zonage de MEPLAN</i>
TRANUS de la Barra, Perez, 1982	Nombreuses applications en Amérique Latine telles que l'extension de la ligne de métro de Caracas en 1981 par exemple. En Europe, évaluation de l'impact du R.E.R. Bruxellois en 1998.	<i>Intégrés</i>	<i>Représenté.</i> Les prix s'ajustent à l'équilibre à chaque période.	<i>N'importe quel degré de résolution spatiale.</i> Applications à l'échelle communale.
METROSIM Anas, 1982	Région métropolitaine de New-York (NYMTC-LUM). Issu de nombreux travaux depuis 1982 (CATLAS, Chicago ; CPHMM, San Diego et NYSIM (New-York).	<i>Intégrés</i>	<i>Représenté.</i> Les prix fonciers et immobiliers sont déterminés d'après l'hypothèse d'équilibre entre offre et demande dans chaque zone.	<i>Zones de trafic</i> déterminées par le module de transport.

Tableau 4 : Les modèles quasi-dynamique basés sur l'activité

Modèles	Application	Intégrés/Connectés	Marché foncier et immobilier	Résolution spatiale
IRPUD Wegener, 1983, 1998	Aire métropolitaine de DORTMUND. Considéré par ISGLUTP ³ comme le plus puissant des modèles opérationnels. 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 et de la population elle-même désagrégée très fortement suivant des critères socio-économiques.	<i>Connectés</i>	<i>Représenté.</i> Prix fonciers et immobiliers endogènes.	<i>Faible résolution spatiale.</i> L'aire d'étude est subdivisée en zones qui sont connectées par le réseau de transport.
URBANSIM Waddel, 1994	Aire métropolitaine de Eugene-Springfield en 1994. Utilisé dans l'optique de relier la planification de l'occupation de l'espace au transport et à l'environnement et contrôler les effets de la croissance tels que l'étalement urbain, la congestion, le logement, etc.	<i>Connectés</i>	<i>Représenté.</i> Modélisation dynamique de l'ajustement avec retard des prix fonciers et immobiliers.	<i>Toutes types de résolution spatiale.</i>

³ *International Study Group on Land Use Transport Interaction.* Sous la coordination du British Transport and Road Research Laboratory (TRRL), plusieurs urbanistes ont conduit entre 1981 et 1991 des modèles de simulation des scénarios de transport et d'urbanisation pour plusieurs villes en Europe, en Amérique du Nord et au Japon.

4. Le choix d'URBANSIM

Les chapitres précédents ont permis de faire le point sur les différentes approches des interactions entre transport et urbanisme, ainsi que sur les principaux modèles représentatifs de ces conceptions. Il reste maintenant à réaliser une sélection raisonnée pour aboutir au choix du modèle *LUTI* qui sera utilisé dans le cadre de *SIMBAD*. Un retour sur les objectifs généraux du projet et ses exigences en matière de modélisation va permettre de guider l'argumentaire.

L'objectif du projet est de soutenir la réflexion et les débats sur les impacts économiques, environnementaux et sociaux à long terme que les politiques de transport et d'urbanisme peuvent avoir sur les mobilités quotidiennes et les trafics qu'elles entraînent au sein du bassin d'emploi d'une grande agglomération. Pour cela, dans le cadre du projet, l'approche modélisatrice a été privilégiée pour permettre de tester ces politiques dans différents contextes prospectifs et d'évaluer leurs éventuels impacts au sein des trois dimensions traditionnelles du développement durable.

L'expérience du Laboratoire d'Économie des Transports en matière de modélisation dans le champ des transports apparaît ici comme un atout. Le constat tiré de nos derniers travaux, selon lequel les améliorations en matière de modélisation du système de transport urbain passaient d'abord et avant tout par une meilleure prise en compte des interactions entre transports et urbanisme (Cabane et alii, 2000, Masson, 2000)⁴, nous conduit aujourd'hui à insister particulièrement sur ce thème et à chercher à développer un tel module dans le projet *SIMBAD* s'il veut pouvoir disposer d'une vision de long terme pertinente.

De ce préambule, plusieurs conclusions pragmatiques peuvent déjà être tirées pour guider le choix d'un modèle *LUTI* :

- ✓ L'exigence de *SIMBAD* est tournée vers l'enrichissement de l'approche transport, elle n'est pas dans le développement d'un outil novateur en matière de *LUTI* : c'est pour cela que même si les développements récents proposés par la micro-simulation, les automates cellulaires ou les systèmes multi-agents ont été évoqués et présentés, ils n'ont pas été retenus pour la suite.
- ✓ L'expérience du LET mérite d'être valorisée et la sélection d'un modèle qui permette d'intégrer facilement nos outils "transport" existants doit être privilégiée. En ce sens, les approches "connectées" sont plus favorables que les "intégrées".
- ✓ Notre connaissance collective en matière de *LUTI* est pour l'instant limitée. Une solution classique est donc préférable, ce qui renvoie au premier critère avancé. Par ailleurs, un modèle qui soit appropriable par l'équipe, qui nous permette d'apprendre et d'acquérir une première expérience dans ce domaine constituera un avantage indéniable.

A ces trois premiers critères, qui découlent du bon sens stratégique lorsque l'on croise les objectifs du projet et les savoirs-faire de l'équipe, s'en rajoutent trois autres qui ont plus directement trait à la modélisation des interactions entre transport et urbanisme dans le cadre de *SIMBAD*.

⁴ Cabanne I, Durand S, Hennebelle P-Y, Masson S, Routhier J-L, Saliou E., 2000, *Télescope : Modèle de simulation des trafics de marchandises et de personnes locaux et interurbains dans un espace région-ville*, LET, rapport pour le compte de l'ADEME - PREDIT, 171 p.

MASSON S., 2000. *Les interactions entre système de transport et système de localisation en milieu urbain et leur modélisation*. Thèse de Doctorat ès Sciences Economiques, Université Lumière Lyon 2, 570 p.

- ✓ Tout d'abord, il apparaît nécessaire que la représentation des localisations des ménages et des activités passe par la prise en compte du marché foncier et immobilier. En effet, il est difficile de saisir les aspects clés du processus de développement urbain ou de tester des politiques publiques qui ont un impact sur les prix du foncier sans une modélisation de ce marché. La représentation et la compréhension de la localisation des ménages sur l'aire d'étude en fonction de leur niveau de revenu, éléments importants de la dimension sociale de notre travail (cf. rapport n°2 sur les indicateurs), nécessitent également la prise en compte de ce marché.
- ✓ L'aspect dynamique du modèle constitue un autre point important. En effet, l'origine d'une recherche de modèle *LUTI* se trouve dans le constat d'un manque dans la représentation de la boucle entre impacts des transports sur l'urbanisme qui, en retour, affectent les échanges à l'intérieur de l'aire d'étude. C'est bien cette double dynamique avec ses rythmes décalés (les variations d'accessibilité sont immédiates, les adaptations en terme de localisation sont beaucoup plus longues) qui nous intéresse. Ceci permettra par ailleurs d'envisager éventuellement des évolutions progressives du contexte des scénarios ou des réactions retardées des politiques publiques de transport ou d'urbanisme (cf. rapport n°3 sur la prospective dans *SIMBAD*).
- ✓ La nécessité de disposer très rapidement d'un très grand nombre de données pour alimenter les modèles *LUTI* a également été abordée tout au long du rapport. Ceci peut constituer un écueil, comme en témoigne la tentative d'implantation de *TRANUS* sur l'agglomération lyonnaise (CERTU, 1996). En la matière, un premier recensement des données existantes (cf. annexe) indique que depuis 1999, nombre d'entre elles existent à l'îlot et que les autres le sont à la commune, qui apparaît constituer le niveau de base de dialogue entre les différents modules du futur modèle. Le modèle *LUTI* doit donc pouvoir travailler à ce double niveau et, dans le cadre général des objectifs de *SIMBAD*, nous n'ambitionnerons pas de travailler à des niveaux plus fins comme l'adresse ou la parcelle cadastrale.

Lorsque l'on reprend l'ensemble de ces critères, le modèle *URBANSIM* se dégage progressivement. Parmi les modèles d'interaction entre transport et urbanisme présentés dans le tableau final de la partie précédente, *URBANSIM* diffère en effet de façon significative des nombreuses autres approches de modélisation opérationnelle existantes, notamment des modèles d'interaction spatiale *DRAM/EMPAL*, des modèles spatiaux "entrées-sorties" *TRANUS* et *MEPLAN*, du modèle *MUSSA* développé par Martinez, ou encore du modèle *CATLAS* de Anas, devenu plus tard *METROSIM* ou *NYMTC-LUM*.

Les modèles statiques tels que *METROPOLIS*, *DSCMOD* ou *MUSSA* ne permettent pas d'envisager de réelle boucle interactive entre transport et urbanisme. Tout au plus, l'état des transports initialement fourni au modèle est intégré dans l'explication des résultats d'occupation des sols. Les modèles dynamiques basés sur l'entropie comme *LILT* ou *DRAM/EMPAL*, s'ils intègrent mieux cette boucle, ne passent pas par une représentation des prix du marché immobilier et foncier. Or, nous l'avons vu, outre son apport dans la compréhension du processus, ce marché nous permettra de montrer comment les ménages peuvent se redistribuer sur le territoire en fonction de leur revenu.

TRANUS, *MEPLAN*, *METROSIM* et *URBANSIM*, présentent, à des degrés différents, de solides bases théoriques. Ils sont notamment fondés sur une base micro-économique qui leur permet de développer fort convenablement les marchés fonciers et immobiliers. Ils fournissent une structure logique conduisant à une estimation quasi-dynamique des interactions entre transport et développement du sol. Enfin, ils offrent la possibilité de prendre en compte un réseau de transport multimodal, permettant ainsi de considérer des possibilités de substitution.

Par contre, les trois modèles spatio-économiques disposent d'un modèle de transport intégré et l'adaptation des outils développés au LET en matière de transport risque d'être plus lourde et plus

difficile. La plate-forme proposée par *URBANSIM*, plus souple et plus ouverte, convient ici mieux à nos besoins et nos possibilités. La prochaine version du modèle, *OPUS*, qui devrait être disponible à partir d'octobre 2005, joue à fond cette carte de la flexibilité et de la modularité. Par ailleurs, *URBANSIM* est un modèle plus récent, qui a explicitement cherché à prendre en compte les expériences passées pour éviter certaines limites des modèles précédents tels que *DRAM/EMPAL* ou *TRANUS*.

URBANSIM reste cependant un outil complexe qui peut requérir de nombreuses données. Par contre, sa structure lui permet de s'adapter aux différents types de résolution spatiale en fonction des données disponibles sur le marché que l'on veut représenter. Il importera donc de bien dimensionner l'effort de modélisation au regard des objectifs de *SIMBAD*.

Enfin, concernant le critère de potentialités de partage d'expériences et d'acquisition de connaissance collective au niveau de l'équipe du projet, *URBANSIM* apparaît comme idéal. En effet, c'est un modèle public accessible directement en ligne avec sa documentation⁵, et permettant à quiconque d'apporter des améliorations, contrairement aux autres modèles qui sont des propriétés privées. Il a la réputation d'être mis au point par une équipe universitaire qui répond facilement aux problèmes exposés par ses utilisateurs. Par ailleurs, l'existence d'implantations en cours à Zürich, Paris et Amsterdam, là encore avec la participation d'équipes universitaires, laisse présager la possibilité de partages d'expériences au niveau européen, avec son contexte spécifique différent de celui des États-Unis.

⁵ www.urbansim.org

Annexe : données recensées sur l'aire urbaine de Lyon

1. Marché foncier et immobilier

<i>Données</i>	<i>Année de référence</i>	<i>Disponibilité</i>	<i>Territoire couvert</i>	<i>Niveau de finesse géographique</i>	<i>Description</i>
MIN	à partir de 1990	à acquérir – société Perval	France entière (moins Ile de France)	régional, départemental et communal	<ul style="list-style-type: none"> - recense les transactions immobilières et foncières - caractéristiques des biens : type (maison, appartement, terrain) ; surface, nombre de pièces, époque - appartements et maisons ; destination, viabilité, encombrement, classement PLU POS, surface HON – terrains ; localisation - caractéristiques des mutations : prix, taxes, nature de la transaction - caractéristiques des vendeurs et des acheteurs : CSP, age, sexe, commune de résidence, type - limites : mesure partielle des volumes de transaction, taux de renseignements de certaines variables
OTIF	1990-2000	base existante – possible accès par convention ou partenariat avec la Communauté Urbaine de Lyon	Grand Lyon	cadastre	<ul style="list-style-type: none"> - ces données sont strictement confidentielles et restent la propriété de la Communauté Urbaine de Lyon - ventes de logements collectifs neufs familiaux - ventes de logements collectifs neufs en résidence - ventes de logements collectifs anciens - ventes de maisons individuelles anciennes - ventes de maisons individuelles neuves - ventes de terrains

OTIF (Suite)	1990-2002	acquisition possible - Grand Lyon (gratuit pour l'Agence d'urbanisme)	Grand Lyon	communes	- transactions immobilières et foncières
Enquête sur les loyers		Agence d'urbanisme	Grand Lyon	agrégé (découpage de l'aire du Grand Lyon en 5 régions)	- seulement sur les logements - seulement une synthèse des indicateurs principaux
Marché locatif (CNAB Lyon)	1992, 1993, 1995, 1996, 1997, 1999	LET	Grand Lyon		- papiers + rapports CNAB

2. Localisation des activités

<i>Données</i>	<i>Année de référence</i>	<i>Disponibilité</i>	<i>Territoire couvert</i>	<i>Niveau de finesse géographique</i>	<i>Description</i>
SIRENE (INSEE)	1999	LET – acheté	aire urbaine de 1990	communes	- fichiers des établissements et activités principales des établissements - l'encodage à l'IRIS est faite par le LET avec l'aide de l'Agence d'urbanisme de Lyon ayant fourni SIRENE à l'îlot sur le Grand Lyon (convention)
	1999	LET – recalculé (David Caubel)		IRIS	-

	en principe, tous les ans	Agence d'urbanisme	aire urbaine	îlot	<ul style="list-style-type: none"> - pour compléter les données sur les 45 km autour de Lyon et pour la synthèse pour chaque commune – payant - carte avec la localisation (adresse) de chaque établissement - décomposition en 700 catégories d'activités
UNEDIC	en principe, tous les ans	Agence d'urbanisme	les 45 km autour de Lyon	communes	<ul style="list-style-type: none"> - données que sur l'emploi salarié privé - décomposition en 700 catégories d'activités
Correspondance IRIS – îlots (INSEE)		LET - acheté	France entière		<ul style="list-style-type: none"> - code de correspondance entre les IRIS et les îlots
CONTOURS – IRIS 2000 (INSEE)	2000	LET – acheté + partenariat INRETS + IERSO dans le cadre d'un contrat	aires urbaines de Lyon, Paris, Bordeaux, Toulouse, Pau, Dijon, Agen et Villefranche		<ul style="list-style-type: none"> - fonds de cartes des contours IRIS (MAPINFO + GEOCONCEPT)
CONTOURS - communes		LET	France entière		<ul style="list-style-type: none"> - fonds de cartes des communes (MAPINFO + GEOCONCEPT)
IRIS-2000 référence (INSEE)	1999	partenariat IERSO	France entière	IRIS	<ul style="list-style-type: none"> - résultats principaux des exploitations principales et complémentaires du RGP de 1999 - 150 indicateurs de cadrage au niveau IRIS et comparaison 1990/1999
IRIS-2000 adresse (INSEE)		à acquérir – INSEE, 45 euros	France entière		<ul style="list-style-type: none"> - tables des correspondances îlots adresses/IRIS adresses permettant la correspondance entre l'adresse et la localisation géographique à l'îlot et à l'IRIS
RGP (INSEE)	1990, 1999	Agence d'urbanisme		communes	<ul style="list-style-type: none"> - les emplois par commune - données sur les migrations domicile – travail

Inventaire communal (INSEE)	1980, 1988, 1998	Agence d'urbanisme		RUL	- équipements, commerces et services
------------------------------------	------------------	--------------------	--	-----	--------------------------------------

3. Population

<i>Données</i>	<i>Année de référence</i>	<i>Disponibilité</i>	<i>Territoire couvert</i>	<i>Niveau de finesse géographique</i>	<i>Description</i>
RGP (INSEE)	1999	LET	France entière	communes	<ul style="list-style-type: none"> - base GEOKIT de la DAEI-SES - plus de 600 variables disponibles quasiment toute à l'IRIS et à la commune (sauf migration alternante et emploi lieu de travail, seulement à la commune) - disponible pour l'ensemble des établissements du MELT sous condition de convention
RGP (INSEE)	1999	LET – sous collaboration avec le CERTU	aires urbaines de Lyon, Paris, Bordeaux, Toulouse, Pau, Dijon, Agen, Villefranche	IRIS	
Revenus fiscaux des ménages (INSEE - DGI)	2000/2001 2001	LET – acheté LET - recalculé	France entière	communes IRIS	- exploitation de la déclaration des revenus 2000 et 2001 et de la taxe d'habitation au 01/01/2001 et 01/01/2002

4. Réseau de transport

<i>Données</i>	<i>Année de référence</i>	<i>Disponibilité</i>	<i>Territoire couvert</i>	<i>Niveau de finesse géographique</i>	<i>Description</i>

Georoute V2 (IGN)	1999	LET - acheté	50 km autour de Lyon		- détail du réseau routier urbain et interurbain pour la cartographie (sous logiciel GEOCONCEPT)
BD CARTO (IGN)	1999	contacts CETE + CERTU – convention possible ???	France entière		- chaque CETE a le détail de la base cartographique BD CARTO - plus de 49 types d'informations géocodées
	1996, 2003	Agence d'urbanisme	région Rhône-Alpes		- informations sur l'infrastructure du réseau de transport (infrastructure construite jusqu'à 2002) (information du SIG sous le logiciel MAPINFO) - réseau routier et ferroviaire - pas d'informations sur les flux - information graphique
Réseau TCL (LET)	1998, 2001 et 2010	LET	PTU de Lyon		- géocodage exhaustive des 2000 stations et de l'ensemble des lignes de TC aux dates de 1998 et 2001 et également géocodage intégral des axes fortes TC du PDU de Lyon (interprété en Tramway) (sous logiciel GEOCONCEPT)
Coûts de transport et vitesses commerciales		SYTRAL – payant ou convention ???			
Desserte dans le réseau SNCF		Agence d'urbanisme à acquérir – SNCF			- les données disponibles à l'Agence (sur CD) sont insuffisantes pour la modélisation
Enquête ménages déplacements	1976, 1985 et 1995	LET	Lyon		- fichiers Paradox (déplacements, ménages, personnes) - fond de cartes sous SIG GEOCONCEPT pour l'enquête de 1995

Bibliographie

Boon F., Gayda S., 2000, « *Quelques impacts du futur R.E.R. sur la région bruxelloise et sa périphérie* », 14ème Congrès des Economistes Belges de Langue Française, 13p.

Brail R.K., Wiggins L.L., “*Using GIS in urban planning analysis*”

Brinckerhoff P., Douglas, 1996, “*Consultant recommendations for the development of phase II databases, models and forecasting methods*”, 36p.

CERTU Lyon, 1996, “*Review of existing land/use transport models*”.

Hunt J.D., Kriger D.S., Miller E.J., May 2005, “*Current operational urban land use-transport modelling frameworks: a review*”, *Transport reviews*, Vol. 25, N°3, 329-376.

Institute for Transport Studies (ITS), 2003, “*Developing sustainable land use and transport strategies, A methodological Guidebook*”, PROSPECTS, 223p.

Johnston R.A., Shabazian, D.R., octobre 2002, “*Uplan: A versatile Urban Growth Model for Transportation Planning*”, TRB, 18p.

Martinez F.J., “*Towards a land use and transport interaction framework*”, *Handbook of Transport Modelling*, 2000, pp. 146-164.

Masson S., 2000, “*Les interactions entre système de transport et système de localisation en milieu urbain et leur modélisation*”, Thèse de Doctorat de Sciences Economiques mention Economie des Transports, 570p.

May A. D., 2003, « *Pour des stratégies de développement durable des transports et de l'aménagement urbain, Guide pour les décideurs* », PROSPECTS, 52p.

Noth M., Borning A., Waddell P., 2001, “*An extensible, modular architecture for simulating urban development, transportation and environmental impacts*”, 25p.

Simmonds D., Echenique M. et al. Bates J., Octobre 1999, “*Review of Land-Use/ Transport Interaction Models*”, DETR, 72p.

Timmermans H., août 2003, “*The saga of integrated land-use transport modeling: how many more dreams before we wake up?*”, 35p.

Torrens P.M., Avril 2000, “*How land-use transportation models work*”, CASA, 75p.

Transport Analysis Guidance (T.A.G.), juin 2003, “*Land-Use/ Transport Interaction Models*”, 29p.

University of Washington, Cambridge Systematics, Inc. and Chandra Bath, 30 juin 2001, “*Land Use and Travel Demand Forecasting Models, Review of the Literature and Operational Models*”, Puget Sound Regional Council, 170p.

U.S. EPA, 2000, “*Projecting land-use change: a summary of models for assessing the effects of community growth and change on land-use patterns*”, EPA/600/R-00/098. U.S. Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, Cincinnati, OH. 260pp.

Waddell P., 2001, “*UrbanSim: Modeling Urban Development for Land-Use, Transportation and Environmental Planning*”, 22p.

Waddell P., 2001, “*Towards a behavioural integration of land use and transportation modelling*”, 9ème conference IATBR, 30p.

Wegener W., Fürst F., 1999, “*Land use transport interaction: state of the art*”, TRANSLAND, IRPUD, 119p.

Wegener M., 2000, “*Land-Use Transport Interaction: State of the Art: What can we learn from North America?*”, 12p.

Wegener M., juillet 2000, “*A new ISGLUTI: The SPARTACUS and PROPOLIS projects*”, Second Oregon Symposium on Integrated Land use and Transport Models, 32p.

SITES INTERNET:

MUSSA: *Modelo de Uso de Suelo de Santiago* :
<http://www.mussa.cl>

ESTEEM: *European Scenarios on Transport-Energy-Environment for Metropolitan areas*:
<http://www.stratec.be/FichesEtudes/AmenagementFR227.html>

SPARTACUS:
<http://www.ltcon.fi/spartacus/default.htm>

URBANSIM:
<http://www.urbansim.org/>

IRPUD:
http://irpud.raumplanung.uni-dortmund.de/irpud/pro2_e.htm#nachhaltig

PROSPECTS:
<http://www.ivv.tuwien.ac.at/projects/prospects.html>

Plan détaillé

1. Introduction.....	3
2 Les fondements théoriques et les outils des modèles d'interaction entre transport et urbanisme	5
2.1. <i>Un ensemble de sous-systèmes aux temporalités différentes.....</i>	<i>5</i>
2.2. <i>Les outils théoriques et méthodologiques développés pour représenter ces interactions.....</i>	<i>7</i>
3 La structure des modèles LUTI et leur classification	11
3.1. <i>Les modèles statiques.....</i>	<i>12</i>
3.1.1. <i>Le modèle METROPOLIS de Lowry (1964) : à l'origine de la modélisation des formes urbaines</i>	<i>13</i>
3.1.2. <i>Les développements récents des modèles statiques.....</i>	<i>13</i>
a) <i>Le modèle DSCMOD (1991).....</i>	<i>13</i>
b) <i>Le modèle IMREL (1991)</i>	<i>14</i>
c) <i>le modèle MUSSA (1992, 1997)</i>	<i>14</i>
3.2. <i>Les modèles quasi-dynamiques.....</i>	<i>16</i>
3.2.1. <i>Les modèles basés sur l'entropie</i>	<i>16</i>
Le modèle DRAM / EMPAL	<i>16</i>
3.2.2. <i>Les modèles spatiaux-économiques.....</i>	<i>19</i>
a) <i>Le modèle MEPLAN</i>	<i>19</i>
b) <i>Le modèle TRANUS</i>	<i>22</i>
c) <i>Le modèle METROSIM</i>	<i>24</i>
3.2.3. <i>Les modèles basés sur l'activité.....</i>	<i>25</i>
Le modèle URBANSIM.....	<i>25</i>
3.3. <i>Les nouvelles modélisations des interactions entre transport et urbanisme</i>	<i>27</i>
3.3.1. <i>Les modèles de micro-simulations basées sur l'activité</i>	<i>28</i>
3.3.2. <i>Les modèles Automates Cellulaires.....</i>	<i>29</i>
3.3.3. <i>Les modèles Multi-Agents</i>	<i>29</i>
3.3.4. <i>Le Sketch Planning Model.....</i>	<i>30</i>
3.4. <i>Un tableau de synthèse des différents modèles évoqués.....</i>	<i>30</i>
4. Le choix d'URBANSIM.....	35
Annexe : données recensées sur l'aire urbaine de Lyon.....	39
Bibliographie	45
Plan détaillé	47