



PREMIER MINISTRE

Commissariat général
à la stratégie
et à la prospective

Département
Développement durable

**RAPPORTS
& DOCUMENTS**

Juillet 2013

Les modèles occupation du sol-transport comme outils d'évaluation

Contribution

Matthieu de Lapparent

Tome 2

Rapport

« *L'évaluation socio-économique en période de transition* »

Groupe de travail
présidé par Émile Quinet

Sommaire

1	Qu'est-ce qu'un modèle intégré « occupation du sol-transport » ?	5
1.1	<i>Un objet</i>	5
1.2	<i>Des objectifs</i>	5
2	Les composantes d'un modèle LUTI	7
2.1	<i>Sous-systèmes</i>	7
2.2	<i>Acteurs</i>	8
2.3	<i>Marchés</i>	10
2.4	<i>Quand offres et demandes se rencontrent</i>	11
3	Familles de modèles	12
3.1	<i>De l'orthodoxie à l'hybridation des approches</i>	12
3.2	<i>Inventaire</i>	14
3.3	<i>Quelques instanciations de modules LUTI en France</i>	18
3.4	<i>Le modèle d'économie géographique de J. Bröcker</i>	18
4	Calibrage, validation, simulation	19
4.1	<i>Information statistique</i>	20
4.2	<i>La boucle données-modèle</i>	21
5	Quelques recommandations	21
5.1	<i>Sensibilité aux formulations mathématiques et aux variables utilisées</i>	22
5.2	<i>Sensibilité aux hypothèses</i>	22
5.3	<i>Sensibilité aux données</i>	22
5.4	<i>Flexibilité</i>	22
5.5	<i>Transparence</i>	23
5.6	<i>Comparaison entre modèles</i>	23
	Références bibliographiques	24

1 Qu'est-ce qu'un modèle intégré « occupation du sol-transport » ?

1.1 Un objet

La distribution spatiale des modes d'occupation du sol (résidentiel, industriel, commercial, santé, éducation, administration, espaces verts artificialisés ou non, etc.) sur un territoire d'étude détermine les localisations des activités humaines telles les lieux de résidence, de travail, d'achat, de formation et d'enseignement, de sports et de loisirs. Cette distribution spatiale des activités engendre des flux de déplacements sur les réseaux de transport qui connectent ces différents endroits. De fait, la forme et l'offre de systèmes de transport (réseaux et leur exploitation) déterminent les conditions de l'accessibilité aux destinations potentielles à partir de toute origine possible au sein du territoire. En retour, les distributions spatiales de l'accessibilité à et vers une/des localisations existantes influencent les choix de planification des modes d'occupation du sol, et donc d'implantation des ménages, des entreprises et leurs établissements.

Il est difficile d'identifier tel ou tel effet de la demande et l'offre d'usage du sol sur la formation de la demande et l'offre de transport, et réciproquement, compte tenu de la multiplicité des facteurs en jeu et de leurs interactions. Un modèle intégré de type « occupation des sols-transport » (OST, aussi appelé modèle LUTI, acronyme reposant sur la terminologie anglaise « *Land Use – Transport Interaction* »), par définition, considère tout ou partie des relations causales et induites entre consommation d'espace et consommation de transport pour différents motifs et différents types d'acteurs. La représentation de ces interactions permet de mener un diagnostic quantitatif complet d'un espace géographique donné suite à la mise en œuvre de politiques conjointes d'aménagement du territoire et/ou de transport.

L'aménagement d'un territoire conditionne les investissements dans les réseaux de transport et leurs performances. En retour, les investissements en projets d'infrastructure ont également un impact sur les décisions de localisation des ménages, des entreprises et leurs établissements, et sur la planification du territoire considéré. De nombreux travaux théoriques et empiriques montrent à la fois l'importance de considérer ces circularités mais aussi les difficultés relatives à leur quantification.

1.2 Des objectifs

L'évaluation socio-économique des effets de politiques d'aménagement du territoire ou d'investissement en infrastructure de transport nécessite de prendre en compte la complexité de ces interactions transport – urbanisme. En parallèle des méthodes d'évaluation usuelles ont été développées, depuis maintenant plusieurs décennies, un ensemble de modèles permettant de rendre compte, au vu des présupposés et des données utilisées pour leur mise en œuvre opérationnelle, de tels effets. La finalité de telles approches est de pouvoir simuler (pour différentes hypothèses) les effets probables des politiques d'urbanisation et des projets de transport et d'évaluer ces effets à un niveau social, économique et financier. De telles politiques peuvent, sans exclusive, porter sur :

- les incidences d'un plan d'urbanisme sur la demande de transport, des choix

d'équipement et d'usage de modes personnels (mécanisés ou non), des choix des lieux d'activités hors du domicile et d'organisation des déplacements afférents, et donc des conditions de circulation sur les différents réseaux de transport une fois agrégé les choix des agents économiques ;

- les effets sur les rentes foncières, les salaires, les prix des biens et services, des investissements en infrastructure de transport ;
- les incidences plus directes d'une raréfaction, volontaire ou non, des capacités du foncier bâti ou non sur les choix d'implantation des ménages et des entreprises ;
- les conséquences d'une variation de l'offre d'aménités et/ou de l'offre d'équipements collectifs sur les choix résidentiels des ménages et des entreprises ;
- les effets des politiques de transport, telle la tarification routière, la tarification des transports collectifs, la tarification du stationnement, sur les choix d'équipement automobile des ménages, leurs choix résidentiels, et les choix d'implantation des entreprises et des établissements ;
- les conséquences de politiques fiscales différenciées dans l'espace ou selon les types de biens et services ;
- les effets de plan de soutien à certaines industries ;
- les conséquences de politiques de régulation ;

Ces modèles doivent être à même de produire une évaluation quantitative globale et des indicateurs afférents aux coûts et aux bénéfices de telles politiques, par exemple :

- les profits des entreprises et leurs établissements ;
- les surplus des consommateurs ;
- les prix, à l'achat et à la location, du foncier bâti et non bâti ;
- la distribution des salaires sur le marché du travail ;
- l'espace consommé ;
- les durées et coûts de transport ;
- l'évaluation des phénomènes de congestion et autres nuisances telles la pollution, le bruit, l'insécurité, la production de déchets, les émissions de gaz à effet de serre. On notera la démarche relativement récente d'intégration de ces nuisances dans les modèles OST.

La plupart des modèles existant à ce jour produisent ces résultats avec des niveaux de détail plus ou moins grands.

Si le développement de ce type de modèle a débuté dans la seconde moitié du 19^e siècle, essentiellement sous forme descriptive ou simplifiée à l'extrême d'un point de vue analytique, nous préjugeons que l'approche proposée par Lowry en 1964 signe le point de départ d'une analyse de plus en plus détaillée et opérationnelle des interactions entre usage du sol et transport. Depuis, de nombreux modèles d'interaction ont été développés. Ils sont très diversifiés, tant du point de vue de leurs bases théoriques, des techniques de modélisation qu'ils emploient, et des données qu'ils utilisent, et de leurs portées en termes de simulation et de prospective.

La présente note a pour objet de brièvement passer en revue les caractéristiques essentielles de tels modèles, ce qui les distingue, et d'établir dans quelles mesures il nous apparaît important de les concevoir comme des outils plus complémentaires que concurrentiels. Une étude plus approfondie de leurs architectures respectives nous semble importante si nous souhaitons à terme être à même de sélectionner, selon les besoins, ceux qui semblent les plus pertinents en tant qu'outils à standardiser dans les études d'évaluation économique des coûts et avantages générés par différentes politiques d'aménagement du territoire, en particulier celles relatives aux investissements dans l'infrastructure de transport.

Pour l'exercice de comparaison d'approches existantes, nous nous inspirons très largement des travaux déjà effectués par Wegener (2004), Waddell (2005).

2 Les composantes d'un modèle LUTI

2.1 Sous-systèmes

Wegener (2004) distingue huit éléments constitutifs d'un système urbain et de son espace : les réseaux, le mode d'occupation des sols, le développement de lieux d'emploi, le développement de lieux de résidence, la localisation des volumes d'emploi, la localisation de la population, le transport de marchandises et les déplacements de personnes. Il ajoute un neuvième élément qui permet d'intégrer la dimension environnementale.

Ces éléments évoluent à des rythmes différents. Il est possible de les ordonner selon un critère de temporalité :

- 1) réseaux : transport, eau, énergie. Ces réseaux sont des éléments permanents de la structure physique d'une ville. La modification « non marginale » de ce type d'infrastructure s'opère dans le long terme, typiquement de l'ordre de la décennie ou plus ;
- 2) occupation des sols. La distribution spatiale du mode d'occupation des parcelles (ou tout autres nomenclature permettant l'administration de la subdivision spatiale des terrains occupés) évolue aussi à long terme (5 à 10 ans). Sa dynamique de court (1 à 2 ans) à moyen terme (3 à 5 ans) est essentiellement incrémentale ;
- 3) promotion immobilière non résidentielle : il s'agit ici de la démolition et construction d'immeubles de différents types (bureaux, commerces, entrepôts, etc.) dédiés à des activités autres que le logement sur les parcelles afférentes. La dynamique d'ajustement de telles décisions est plus rapide que celle concernant les réseaux ou la distribution spatiale de l'occupation des sols par type mais elle reste plus lente que les décisions relatives aux personnes physiques et morales qui occupent ces immeubles ;
- 4) promotion immobilière résidentielle : même point que ci-dessus mais concernant la construction de différents types de résidences pour les ménages et leurs individus ;
- 5) création/disparition/(re-)localisation d'entreprises, d'établissements, et des emplois : il s'agit ici de décisions à plus court terme que les précédentes dans la mesure où il s'agit de décisions d'occupation des immeubles localisés sur des parcelles dédiées ;

- 6) formation/dissolution/(re-)localisation des ménages et des individus : même point que ci-dessus mais concernant les choix résidentiels des ménages et leurs individus ;
- 7) demande de transport des individus : les items précédents sont les générateurs de la demande de transport exprimée par la population et les activités implantées : la localisation des individus et des activités donne naissance aux flux de transport d'individus et de marchandises. Les choix de transport sont des décisions de très court terme comparés aux choix précédents. Notons cependant que les choix d'équipement de transport mécanisés (ou non) sont étroitement liés à ceux concernant la localisation résidentielle en prennent corps à plus long terme que ceux relatifs aux choix d'organisation des déplacements quotidiens ;
- 8) transport de marchandises : déjà soulignés ci-dessus. Il peut aussi s'agir d'échanges intra et inter-industries à l'intérieur du territoire considéré, d'approvisionnement provenant de l'extérieur (importation de marchandises pour la production ou la distribution), ou d'exportations de biens et services intermédiaires et/ou manufacturés ;
- 9) Environnement : ce dernier item est la résultante de tous les précédents et sa dynamique s'inscrit aussi bien dans le long terme que dans le court terme. Dans le dernier cas, il s'agit essentiellement de caractériser les nuisances générées par l'organisation du territoire et les flux de voyageurs et marchandises qu'elle génère : pollution, bruit, insécurité, assainissement et déchets, consommation d'énergie, émission de gaz à effet de serre, etc.

Ces sous-systèmes ne sont pas nécessairement à considérer comme tels mais doivent plutôt être caractérisés au sein de marchés différenciés (au sens de lieu d'échange entre différents types d'offreurs et de demandeurs, et différents types de produits et de services proposés sur ces marchés), lesquels peuvent être a priori ou a posteriori régulés ou non.

Une hypothèse fondamentale de la construction d'un modèle OST est qu'il est possible de qualifier les 9 sous-systèmes précédents en termes de marchés et d'agents économiques. Selon le niveau de détail souhaité, la typologie peut-être très détaillée ou non. Dans une perspective empirique, le degré de désagrégation dépend étroitement de l'information statistique disponible.

2.2 Acteurs

Les agents économiques peuvent être regroupés en quatre grandes familles d'acteurs :

- les propriétaires terriens, comme leur nom l'indique, possède le sol. Il peut s'agir d'agents privés, tels les ménages ou les entreprises, ou d'agents publics, tels l'état ou les collectivités territoriales. Ces parcelles peuvent être déjà dédiées ou non à une (éventuellement plusieurs) activités. Elles peuvent être cédées, vendues, ou louées, sur le marché du foncier ou être conservée en l'état. Un comportement rationnel d'un agent privé sera celui d'un agent qui maximise le bénéfice qu'il retire d'un tel choix. Pour les agents publics, l'objectif n'est pas toujours la maximisation du profit escompté : il peut s'agir d'optimiser une combinaison des surplus des différents acteurs économiques. Notons aussi que la mutation de l'usage d'une parcelle de terre se fait sous réserve d'obtenir l'autorisation administrative des

pouvoirs publics, i.e. le changement du mode d'occupation de cette parcelle n'est pas libre et doit respecter certaines contraintes administratives, ces dernières étant la plupart du temps définies dans des plans locaux d'urbanisme ;

- les entreprises et leurs établissements : les entreprises sont différenciées selon des secteurs d'activités. Typiquement, le secteur de la construction (bâtiment et travaux publics) est celui en charge de développer les immeubles et infrastructures qui doivent exister sur les parcelles de terre dont les modes d'occupation ont été préalablement choisis et que les propriétaires actuels cherchent à valoriser. Cette activité de promotion immobilière conduit à construire des immeubles et infrastructures qui servent d'autres agents économiques, en particulier les ménages et les entreprises mais aussi les administrations publiques. Ces dernières appartiennent à d'autres secteurs d'activités : industrie, commerce et services (aux particuliers et aux entreprises). Le détail concernant le nombre de secteurs d'activités et leurs interactions est un choix à faire en termes de modélisation. Leurs choix de consommation d'espace en certains endroits résultent en général d'objectifs d'optimisation de fonctions de profits : il s'agit pour elles d'accéder à leurs ressources de production (main d'œuvre, capital humain, capital physique, etc., i.e. demande de travail, de capital, et de matières premières), de s'offrir les débouchés (locaux et extérieur au territoire, i.e. distribution et vente de la production de biens et/ou services intermédiaires et/ou finaux) les plus larges, et de bénéficier au mieux des effets positifs liés à l'agglomération des activités et des personnes au sein d'un territoire. Notons que le secteur des transports est constitué d'entreprises qui développent les infrastructures et d'autres qui les exploitent : les deux jouent un rôle primordial dans le niveau de performance des réseaux : à la fois leurs capacités et les offres de services afférentes déterminent l'accessibilité à et vers les implantations des entreprises et leurs établissements ;
- les ménages (et leurs individus) sont à la fois consommateurs de biens et services, dont le logement, offreurs de travail, et voyageurs sur les réseaux de transport. Ils doivent effectuer des choix résidentiels. La vision la plus simple est celle de la consommation d'espace en un lieu donné sans distinguer le type de logement et ses caractéristiques. Ces choix résidentiels déterminent les choix d'équipement en véhicules particuliers (motorisés ou non) et, en conjonction avec l'offre de transport, les déplacements qu'ils effectuent pour accéder à leurs activités de travail et de consommation de biens et services finaux. Ils effectuent un arbitrage entre prix du logement et coûts de transport. Ils offrent leurs compétences sur le marché du travail afin de retirer les ressources nécessaires (sous forme de salaire), outre leur richesse initiale, à ces consommations de logement, de biens et services, et de transport. Un des objectifs en termes de modélisation est de distinguer différents types de ménages selon leur richesse initiale, leur composition démographique, les compétences professionnelles que leurs membres ont à offrir. L'ensemble de ces choix résultent de comportements d'optimisation d'une fonction de bien-être (utilité) sous contraintes de ressources budgétaires et temporelles ;
- les autorités de régulation et les pouvoirs publics sont en charge de la régulation et la planification des différents marchés sur lesquels interviennent ces agents. Leurs objectifs, parfois contradictoires, cherchent à former un consensus acceptable se situant entre la stricte efficacité économique et la seule justice sociale. Les instruments d'action sont la fiscalité (impôts, taxes, redevances) et la réglementation (lois, décrets, normes).

2.3 Marchés

Les relations entre acteurs (agents économiques) prennent corps au sein de marchés sur lesquels des offres et des demandes sont exprimées. Ces marchés sont biens souvent différenciés : les produits offerts et demandés se distinguent les uns des autres selon des caractéristiques qui leurs sont propres.

En outre, la nature et le degré de concurrence opérant sur ces marchés et sous-marchés diffèrent de l'un à l'autre. Ce dernier point est important dans la mesure où, pour la plupart des modèles OST existant, soit la concurrence est supposée pure et parfaite soit elle n'est pas explicitement modélisée et on cherche seulement à ajuster les quantités demandées aux quantités offertes sans caractériser les mécanismes en prix qui conduisent à cet équilibre.

Nous identifions ici certaines des différences existant sur les 6 grands marchés que sont le foncier, le bâti, le logement, le travail, la consommation, le transport :

- **terrains** : on doit distinguer ceux qui ont autorité pour changer le mode d'occupation du sol de ceux qui possèdent le terrain. Pour autant, en pratique, aucun modèle ne considère véritablement le jeu existant entre autorités administratives et propriétaires de terrains ;
- **construction/démolition** :
 - distinction entre promoteurs et bâtisseurs : les premiers sont ceux qui développent les programmes immobiliers une fois obtenu les terrains ou des baux sur ces terrains ainsi que les permis de construire, les seconds sont ceux qui construisent effectivement les immeubles ;
 - dans la pratique des modèles OST, la distinction est ici encore rarement faite : promoteurs immobiliers et constructeurs/démolisseurs sont considérés comme étant un seul et même agent économique ;
- **logement** :
 - ménages : les logements des ménages sont différenciés au minimum entre maison et appartements. Les statuts d'occupation peuvent être aussi différents : propriétaires, locataires, logement à titre gracieux, etc. en pratique, seuls l'achat et la location sont considérés dans les modèles bien que ce ne soit pas systématique ;
 - entreprises : les entreprises n'ont pas les mêmes besoins en termes de locaux : l'immobilier de bureaux, l'immobilier de commerce, l'immobilier d'entrepôt, etc., doivent être distingués. Ces types de bâti ne sont pas uniformément répartis sur le territoire d'intérêt, puisqu'ils dépendent du mode d'occupation des sols choisi par les autorités ;
- **biens et services** : par souci de réalisme, les biens et services de consommation devraient être distingués par secteurs d'activités, éventuellement par produits. Pour certains secteurs, il devrait être aussi possible de considérer les mécanismes de concurrence imparfaite qui peuvent exister entre certaines entreprises : de la concurrence pure et parfaite au monopole privé ou public en passant par la concurrence monopolistique, il existe une variété dans la nature de la concurrence s'exerçant sur les différents marchés, laquelle devrait être un peu mieux caractérisée dans les modèles OST ;

- **travail**: idéalement, la demande et l'offre de travail devraient être différenciées selon les secteurs d'activités considérés dans les modèles mais aussi selon les compétences des travailleurs (par exemple selon une nomenclature par catégorie socioprofessionnelle). Les salaires d'équilibre sont en effet différents pour chaque secteur et profession dans le secteur (sans compter l'existence d'une variance intrinsèque à chacune de ces paires) ;
- **transport**: le marché des transports recouvre plusieurs modes et plusieurs acteurs ;
 - modes de transport :
 - ✓ équipement des ménages : il s'agit là de considérer que l'équipement automobile ne se résume pas au choix d'un seul type de véhicule. Le marché automobile est fortement différencié. D'autres choix que l'automobile peuvent être aussi modélisés : deux roues motorisées, bicyclette, etc. ;
 - ✓ transports collectifs : l'alternative au déplacement en véhicule particulier motorisé (incluant aussi la possibilité du covoiturage) est le recours aux transports collectifs. Ici encore, ces modes de transport sont variés : bus, tramway, métro, etc. notons cependant qu'ils ne sont pas tous accessibles pour n'importe quel itinéraire à effectuer ;
 - ✓ nouveaux modes de transport : partage automobile, transport à la demande ;
 - ✓ les ménages et leurs membres choisissent entre ces modes de transport selon les déplacements qu'ils ont à effectuer. Cette étape du partage modal est critique car elle conditionne les volumes de voyageurs sur le réseau routier (donc les niveaux de congestion) mais aussi dans les réseaux de transport collectifs (cette dernière dimension est encore trop rarement prise en compte dans les modèles de trafic actuels). Les niveaux de service sur ces réseaux conditionnent à leur tour l'accessibilité à et vers différents types d'activités et conduisent à long terme à des processus de relocalisation des ménages et des entreprises ;
 - gestionnaires, concessionnaires, opérateurs et exploitants :
 - ✓ transport de voyageurs : les transports collectifs peuvent être gérés par des régies publiques, des opérateurs privés sous contrats de délégation de service public ou non, ou des professionnels indépendants (par exemple taxis, même sous tutelle d'une fédération). Les capacités de stationnement hors voirie peuvent être déléguées à des entreprises privées ;
 - ✓ transport de marchandises : il s'agit ici de considérer que les entreprises distribuent leurs productions à d'autres entreprises et aux consommateurs. Elles peuvent par exemple le faire en compte propre, auquel cas elles possèdent leurs propres flottes de véhicules, ou faire appel à des prestataires extérieurs (entreprises du secteur d'activités de transport de marchandises) ;
 - réseaux et maillage : il s'agit ici de s'intéresser à l'offre d'itinéraires.

2.4 Quand offres et demandes se rencontrent

La confrontation de ces offres et demandes sur ces marchés déterminent l'équilibre du système territorial. Les interactions entre ces productions et consommations sur

chaque marché et entre les marchés déterminent les prix auxquels les échanges ont lieu. Les quantités échangées dépendent de ces prix d'équilibre. La capacité d'un modèle OST à rendre compte de ces interactions à un niveau suffisamment fin et réaliste détermine grandement la portée des résultats que l'on souhaite en retirer.

Il faut noter que la plupart des modèles que nous allons citer ci-après ne considèrent pas un niveau de détail aussi grand sur tous les marchés qu'ils modélisent. Bien souvent, la réalité est simplifiée pour des raisons d'ordre technique ou de disponibilité de l'information statistique nécessaire à la mise en œuvre de telles approches. Notons aussi que selon le type de modèle OST, l'équilibre en prix n'est pas nécessairement une composante explicite.

3 Familles de modèles

3.1 De l'orthodoxie à l'hybridation des approches

Nous proposons dans cette section de référencer à nouveau les modèles présentés par Wegener (2004) et de les associer à différentes familles. Avant de discuter les particularités de chacun, il nous semble pertinent d'établir dans un premier temps une typologie de ces différentes approches. S'ils traitent des mêmes problèmes, ils diffèrent cependant à la fois dans leurs structures théoriques, leurs formulations mathématiques, et dans la portée des analyses qui peuvent être effectuées. Wegener (2004), Waddell (2005), Bowman, proposent chacun différents axes pour catégoriser ces modèles OST. En retenant les plus pertinents :

- modèles « unifiés » ou modèles « composites » (Wegener et al. 1986) :
 - les modèles « unifiés » possèdent une certaine rigueur quant à la définition des comportements des agents, des marchés, et des interactions entre agents et marchés. Les sous-systèmes considérés dans le modèle ne sont pas définis de manière autonome : ils sont strictement inter-reliés et il n'est pas possible de les séparer les uns des autres. En ce sens, amender ou réviser un tel modèle nécessite de retravailler toutes ses composantes. Cette perte de flexibilité est compensée par une meilleure cohérence de l'architecture du système, une plus grande clarté dans la définition des comportements des agents sur les marchés, et une plus grande transparence dans l'analyse des résultats ;
 - les modèles « composites » envisagent chacun des sous-systèmes de façon autonome, ces derniers étant ensuite hiérarchisés et interconnectés au moyen de variables clé permettant de faire dépendre ces sous-modules les uns des autres. À la différence des modèles unifiés, il est possible de séparer l'un de ces sous-modules de tous les autres sans que les structures internes de ces derniers soient modifiées. Cette plus grande flexibilité, attractive au demeurant, se fait au coût d'une moindre cohérence de l'architecture et dépend dès lors étroitement de la définition plus ou moins *ad hoc* des variables qui permettent de transiter d'un bloc à un autre du système ;
- « écoles de pensée » d'appartenance des modèles. Nous pouvons identifier plusieurs bases théoriques aux modèles OST. Certains restent dans la stricte lignée d'écoles de pensées distinctes, d'autres apparaissent comme hybridation de plusieurs approches :
 - théorie de la base économique. Le mécanisme du « développement basique »

est, simplifié, le suivant : le territoire attire de diverses façons, grâce à un ou plusieurs secteurs d'activités structurellement exportateurs, des revenus de l'extérieur qui constituent la base économique. Ce revenu « capté » stimule et sert de ressort au développement et la croissance de la population et de nouvelles activités qui produisent des biens (de consommation ou d'équipement) et des services vendus localement. Il suit une détermination du niveau de revenu, d'emploi, de population, etc. du territoire concerné (Davezies, 2003) ;

- approches « entrées-sorties » spatialisée, entropie, modèles gravitaires : il s'agit ici d'intégrer explicitement la dimension spatiale à l'analyse « entrées-sorties » traditionnelle afin de prévoir l'influence des changements dans un secteur d'activité particulier à un endroit donné sur ce même secteur et les autres à d'autres endroits ;
- théorie de la rente foncière et ses extensions proposées par l'école de la Nouvelle économie urbaine ;
- théorie microéconomique du consommateur et du producteur (maximisation de l'utilité, maximisation du profit) ;
- approches strictement empiriques, voire robotique, par exemple automates cellulaires (Batty, 1994, 1997) ;
- d'après Wegener (2004) et Waddell (2005) les modèles OST les plus récents intègrent plusieurs bases théoriques et apparaissent désormais comme des combinaisons de plusieurs écoles de pensées. La plupart des approches intègrent aujourd'hui des modèles de choix discret reposant sur la théorie de la maximisation de l'utilité et une matrice de relations inter-industries ;
- modèles d'équilibre général ou d'équilibre partiels, modèles de simulation dynamique, modèles sans détermination d'équilibre en prix : tous les modèles ne caractérisent pas l'équilibre du système par un vecteur de prix (rentes foncières, loyers, salaires, prix à la consommation, coûts de transport) permettant d'égaliser offres et demandes des différents agents sur les différents marchés considérés. Certains ne considèrent qu'une succession d'équilibre partiels, d'autres seulement l'équilibre de certains sous-systèmes (notamment transport), d'autres encore ne cherchent même pas d'équilibre mais raisonne à prix donnés ou avec des fonctions auxiliaires de prix (alors vu comme de simples instruments) de manière à ce que les quantités offertes et demandées s'ajustent. Notons aussi la différence entre les modèle dont l'objet est de chercher un état stationnaire du système à une date donnée et les modèles qui cherchent à caractériser la dynamique du système ;
- résolution spatiale et désagrégation des comportements des agents :
 - modèles macroscopiques et mésoscopiques : la plupart des modèles produisent des résultats pour des groupes de populations et/ou des zones géographiques ;
 - modèles de micro-simulation : une nouvelle génération de modèles est en cours de développement et considère explicitement le comportement propre à chaque agent ;
- dynamiques des populations : tous les modèles n'intègrent pas explicitement de modules de transition démographique des entreprises et des ménages. De fait, la dynamique des distributions des populations et des emplois est bien souvent exogène.

3.2 Inventaire

Entre l'inventaire de Wegener (2004) et quelques recherches complémentaires, nous référençons 31 modèles de type OST. La liste établie par l'auteur est constituée des modèles suivants :

- BOYCE : modèles combinés de localisation et de transport développé par Boyce (Boyce et al. 1983, 1985; Boyce and Mattsson, 1991; Boyce et al. 1992)
- CUFM : California Urban Futures Model (Landis 1992, 1993, 1994; Landis and Zhang, 1998a, 1998b)
- DELTA : modèle OST de Davids Simmonds Consultancy, Cambridge, UK (Simmonds and Still, 1998; Simmonds, 2001)
- ILUTE : Integrated Land Use, Transportation, Environment (Miller and Salvini, 2001)
- IMREL : Integrated Model of Residential and Employment Location (Anderstig and Mattsson 1991, 1998)
- IRPUD : le modèle de la région de Dortmund (Wegener, 1982a, 1982b, 1985, 1986a; Wegener et al. 1991; Wegener, 1996, 1998b)
- ITLUP : Integrated Transportation and Land Use Package par Putman (1983, 1991, 1998)
- KIM : modèle non linéaire d'équilibre développé par Kim (1989) and Rho and Kim (1989)
- LILT : Leeds Integrated Land-Use/Transport model (Mackett 1983, 1990c, 1991a, 1991b)
- MEPLAN : modèle OST de Marcial Echenique & Partners (Echenique et al., 1969; Echenique and Williams, 1980; Echenique, 1985; Echenique et al., 1990; Hunt and Echenique, 1993; Hunt and Simmonds, 1993, Williams 1994; Hunt 1994)
- RELU-TRAN : Regional Economics and Land Use – TRANsportation par Anas (1992, 1994, 1998). METROSIM, CATLAS, NYTC-LUM sont des prédécesseurs.
- MUSSA : le modèle OST en 5 étape de Martinez (1991, 1992a, 1992b; Martinez and Donoso, 1995; Martinez, 1996, 1997a, 1997b), initialement développé pour la ville de Santiago du Chili
- PECAS : Production, Exchange and Consumption Allocation System (Parsons Brinckerhoff Ohio et al., 1999; Hunt and Abraham, 2003)
- POLIS : Projective Optimization Land Use Information System (Prastacos, 1986; Caindec and Prastacos, 1995)
- RURBAN : Random-Utility URBAN model (Miyamoto et al., 1986; Miyamoto and Kitazume, 1989; Miyamoto and Udomsri, 1996)
- STASA : the master-equation based transport and urban/regional model (Haag 1990);
- TLUMIP : Transport and Land Use Model Integration Program (ODOT, 2002)
- TRANUS : modèle OST de de la Barra (de la Barra, 1982; de la Barra et al. 1984; de la Barra 1989, 1998)

- TRESIS : TRansportation and Environment Strategy Impact Simulator (Hensher and Ton 2001)
- URBANSIM : le modèle de Waddell (1998a, 1998b, 2002; Waddell et al. 1998)

Le tableau ci-après reprend ceux décrit par Wegener (2004) et permet de se donner une idée sur les sous-systèmes qui sont développés pour chacun d'entre eux.

Sous-systèmes développés dans les modèles OST

	Réseaux	Occupation du sol	Immobilier de bureau	Immobilier résidentiel	Localisation de l'emploi	Localisation de la population	Transport de marchandises	Transport de voyageurs
BOYCE	x				x	x		x
CUFM		x	x	x	x	x		
DELTA		x	x	x	x	x		
ILUTE	x	x	x	x	x	x	x	x
IMREL	x	x	x	x	x	x		x
IRPUD	x	x	x	x	x	x		x
ITLUP	x	x			x	x		x
KIM	x				x	x	x	x
LILT	x	x	x	x	x	x		x
MEPLAN	x	x	x	x	x	x	x	x
RELU-TRAN	x	x	x	x	x	x		x
METROSIM	x	x	x	x	x	x		x
CATLAS	x	x	x	x	x	x		x
NYTC-LUM	x	x	x	x	x	x		x
MUSSA				x	x	x		
PECAS	x	x	x	x	x	x	x	x
POLIS		x			x	x		
RURBAN		x			x	x		
STASA	x	x	x	x	x	x	x	x
TLUMIP	x	x	x	x	x	x	x	x
TRANUS	x	x	x	x	x	x	x	x
TRESIS	x	x	x	x	x	x		x
URBANSIM		x	x	x	x	x		

Source :auteur

Parmi ces modèles, seuls les modèles ILUTE, MEPLAN, STASA, PECAS, TLUMIP, et TRANUS, traitent des huit sous-systèmes. IRPUD, LILT, RELU-TRAN, et TRESIS traitent aussi les huit sous-systèmes mais ne considèrent pas le problème du transport de marchandises. KIM s'intéresse au transport de marchandises mais ne modélise pas les modes d'occupation du sol ni le marché du développement immobilier. En tout état de cause, les modèles ne traitant pas des tous les sous-systèmes raisonnent conditionnellement à l'état de ceux non modélisés et laissent la possibilité de pouvoir y greffer des modules autonomes afin de compléter l'approche.

Six modèles, DELTA, CUFM, MUSSA, POLIS, RURBAN, et URBANSIM, ne possèdent pas leurs propres modèles de transport. Ils conservent la possibilité d'un greffon, i.e. il est possible d'utiliser un modèle de trafic autonome et d'en injecter les résultats au moyen de calcul de variables explicative qui servent de déterminants aux choix

d'occupation du sol, de développement immobilier, et de localisation des ménages et des entreprises.

BOYCE, ITLUP, KIM, POLIS, RURBAN, ne considèrent pas la promotion et le développement immobilier comme un comportement spécifique. Notons aussi que près de la moitié de ces modèles ne distinguent pas les comportements de localisation des agents des comportements des promoteurs immobiliers et des constructeurs, ces derniers ajustant instantanément (sous réserve de disponibilités foncière) les stocks et surfaces d'immeubles aux demandes des ménages et entreprises.

BOYCE, KIM, et MUSSA, n'intègre pas les modes d'occupation du sol. Notons que la dernière version en cours de développement du modèle MUSSA, du moins sa version commercialisée dans le logiciel CUBE, semble tendre vers le traitement des huit sous-systèmes.

Onze des modèles présentés appartiennent à la catégorie des modèles dont l'architecture est unifiée : BOYCE, MUSSA, KIM, MEPLAN, RELU-TRAN, CATLAS, NYTC-LUM, PECAS, RURBAN, TRANUS et STASA. Les autres sont des modèles composites : chaque bloc peut être traité de manière indépendante. Certains modèles ne laissent que peu de liberté dans leur formulation mathématique, par exemple RELU-TRAN, METROSIM, CATLAS, NYMTC-LUM, ou encore TRANUS. Pour les sous-systèmes considérés dans ces modèles, à la fois les formulations mathématiques des équations et leurs relations sont difficilement modifiables. Ce peut être une force, lorsque l'on souhaite mettre l'accent sur l'architecture théorique du modèle (définition rigoureuse des comportements des agents économiques), ou une faiblesse lorsque l'on souhaite se donner plus de flexibilité dans la prise en compte de particularités propres au cas d'étude. Pour autant, la paramétrage de ces fonctions mathématiques laissent une marge de manœuvre suffisante pour caractériser une large variété de comportements.

Seuls les modèles DELTA, ILUTE, IRPUD, LILT, et URBANSIM, considèrent la dynamique démographique des ménages et des entreprises. Les autres modèles considèrent cette dynamique comme exogène.

Lorsque nous nous intéressons aux fondements théoriques des différents modèles, nous observons que la plupart des modèles d'aujourd'hui, à l'exception de CUFM, reposent en partie ou totalement sur la théorie de la maximisation de l'utilité aléatoire, du moins sur la théorie du choix discret, afin d'expliquer les comportements des différents agents économiques considérés. Pour autant, ces modèles restent différents dans leur formulation mathématique (formes fonctionnelles et variables explicatives des comportements).

14 modèles caractérisent la notion d'équilibre (partiel ou général) en prix sur tout ou partie des marchés considérés :

- seuls RELU-TRAN, CATLAS, NYTC-LUM, et KIM, sont des modèles d'équilibre général calculable spatialisés, où l'ensemble des marchés sont équilibrés par les prix simultanément (rentes foncières, prix à la consommation, salaires, etc.), c'est-à-dire où ces prix sont le résultat des confrontations des offres et demandes sur les différents marchés considérés ;
- ILUTE, IRPUD, ITLUP, TLUMIP, sont des modèles où l'équilibre est atteint sur le seul marché des transports ;

- IMREL, MEPLAN, PECAS, TRESIS, et TRANUS, considère des mécanismes d'équilibre séparés pour le bloc occupation du sol-localisation et le bloc transport ;
- BOYCE et LILT ne considèrent pas d'équilibre en prix mais seulement l'allocation spatiale des volumes d'offres et demandes à prix donnés. MUSSA, RURBAN and STASA sont aussi des modèles d'équilibre offre-demande à prix donnés ;
- ILUTE, IRPUD and URBANSIM définissent l'équilibre en prix sur le marché du foncier et/ou du logement à partir d'un modèle auxiliaire reliant les prix à d'autres variables explicatives (provenant elles-mêmes des autres modules du système) ;
- toutes les approches possédant leurs propres modèles de transport caractérisent les choix de destination et d'itinéraire sur la base de modèle de choix discret ou à partir de la notion d'entropie. La seule exception est le modèle STASA. La congestion routière est prise en compte mais les contraintes de capacités dans les transports en commun ne l'est pas.

Nous notons aussi que MEPLAN, RELU-TRAN, METROSIM, CATLAS, NYMTC-LUM, PECAS, TRANUS, utilisent la théorie de la base économique pour relier la population locale et l'emploi en dehors du secteur d'activité de base aux volumes des exportations des industries de ce dernier.

DELTA, ILUTE, IRPUD, LILT, TLUMIP, URBANSIM utilisent des modèles probabiliste âge-cohorte-période pour leurs modules de transition démographique des ménages et des entreprises.

IRPUD s'inspire aussi de la notion de prime espace-temps afin de caractériser les ensembles de choix des agents dans son modèle de transport.

En termes de modélisation, tous les modèles représentent le territoire d'étude comme un ensemble de zones contiguës. Le temps est discret. Dans 12 modèles (BOYCE, IMREL, KIM, LILT, MEPLAN, RELU-TRAN, CATLAS, NYMTC-LUM, METROSIM, PECAS, RURBAN and TRANUS), le calcul de l'équilibre du système est direct. Dans les autres modèles le bloc occupation du sol et le bloc transport interagissent de façon récursive. Ce dernier affecte le premier par injection de mesures d'accessibilité, ce qui modifie la matrice des déplacements et donc impacte à nouveau l'équilibre sur le marché des transports. Le processus est itéré jusqu'à obtention d'un état stable. Dans les modèles avec représentation explicite des réseaux de transport, i.e. où le choix d'itinéraire intervient, les algorithmes d'affectation de trafic sont classiques.

Notons qu'à l'exception du modèle CUFM, les résultats produits sont agrégés par zone géographique et/ou par groupe de population. CUFM, ILUTE, TLUMIP, URBANSIM, IRPUD permettent pour autant de faire appel aux récentes approches dites de micro-simulation ou de simulation multi-agent. Ces récents développements renouvellent actuellement la dynamique de recherche sur ces modèles dans la mesure où tous peuvent potentiellement être désagrégés au niveau de chaque acteur économique présent dans la région (voir aussi Wegener et Spiekermann, 1996, Ferrand, 2000).

Nous notons l'existence d'autres modèles dont l'étude détaillée de leurs architectures et leurs propriétés pourrait contribuer à l'amélioration de la connaissance sur le sujet : MARS, TIGRIS-XL, METROSCOPE, TIGER, RAMBLAS, ILUMASS, PIRANDELLO. Nous disposons de peu de documentation explicite sur ces modèles.

3.3 Quelques instanciations de modules LUTI en France

Il nous semble intéressant d'identifier lesquels de ces modèles ont actuellement cours en France. À notre connaissance, il existe actuellement deux instanciations du modèle UrbanSim pour la région Île-de-France, l'une portée par l'Université de Cergy-Pontoise et l'autre par l'Institut d'aménagement urbain (UltiSim). UrbanSim est aussi développé pour l'agglomération Lyonnaise par le Laboratoire d'Economie des Transports (SimBAD). Le système développé par l'Université de Cergy-Pontoise sert à l'évaluation des effets du réseau de métro automatique du Grand Paris. Le système développé par l'Institut d'aménagement urbain de la région Île-de-France sert à la fois à l'évaluation de différents projets d'extension du réseau de transport en commun existant et de projets d'aménagements urbains. Le système développé par le Laboratoire d'économie des transports a les mêmes objectifs pour l'agglomération Lyonnaise. D'après la documentation sur ces applications particulières, les auteurs témoignent de la flexibilité de la plateforme de simulation en termes de possibilités de modélisation (formulation mathématiques des comportements, degré de désagrégation, possibilité de greffer un modèle de trafic indépendant du module d'occupation du sol, etc.) mais de la difficulté liée à au calibrage et à la validation du système ainsi qu'à sa sensibilité aux données utilisées. Nous pensons que ces deux derniers points ne sont pas une particularité de ce système mais plutôt une remarque plus générale concernant la « gourmandise » de tout modèle OST en termes de données.

Un prototype du modèle RELU-TRAN a été développé dans le cadre du projet d'évaluation des effets économiques du métro automatique du Grand Paris. Il s'agit d'une version simplifiée de l'architecture complète du modèle.

Le modèle PIRANDELLO a aussi été appliqué à l'évaluation des effets du métro automatique du Grand Paris. Plus ancien, il servait déjà à l'évaluation d'extension du réseau de transport en commun et du réseau routier.

RELU-TRAN et PIRANDELLO possèdent un modèle de trafic indissociable du reste du système. PIRANDELLO a en outre un modèle de trafic sur les réseaux de transport en commun qui prend en compte la congestion, chose rare, tandis que le premier ne simule pas le trafic sur les réseaux de transport en commun. Toutes les versions d'UrbanSim ont un modèle de trafic exogène qui est rattaché au bloc d'occupation du sol au moyen de variables clé (mesure d'accessibilité, de temps, de distances).

Le modèle TRANUS, après un premier essai infructueux pour l'agglomération Lyonnaise, a été mis en œuvre pour l'agglomération Grenobloise. Le modèle a été mis à jour récemment.

3.4 Le modèle d'économie géographique de J. Bröcker

Nous souhaitons discuter d'un point qui n'est pas souvent détaillé dans les modèles OST. Ces derniers s'adressent à des problématiques locales, de la ville jusqu'à la région. Le reste du monde n'est pas vraiment pris en compte, si ce n'est au moyen de quelques zones géographiques supplémentaires qualifiées comme telles. Pour autant, il nous semble important d'ajouter une couche à ces modèles OST : celle concernant les relations que peut entretenir le territoire d'étude avec d'autres territoires bien

identifiés. Si l'objet des modèles OST est d'étudier les effets de différentes politiques à un niveau local pour un territoire donné, il convient de reconnaître que la détermination de certaines quantités totales (population, entreprises, etc.), outre la création nette de nouvelles entités, relèvent de phénomènes migratoires de et vers d'autres régions.

Idéalement, chaque modèle OST devrait être accompagné d'un modèle macroscopique spatialisé qui permettrait d'établir formellement quels sont les déterminants des choix d'une région de localisation avant de s'intéresser à l'endroit précis de la localisation à l'intérieur de cette région. Ceci permettrait de rendre endogène au système les volumes totaux de population, entreprise et emploi à spatialiser au sein du territoire considéré.

Bröcker (1998) a développé un modèle d'équilibre général calculable spatialisé pour l'Europe dont l'unité géographique est le niveau NUTS3 (département) pour la France. Le modèle initial comprend 805 zones, dont 800 pour l'Europe. Les problématiques de la localisation des populations, de l'emploi, la consommation de biens et services et les flux échangés entre zones sont explicitement modélisées. Le modèle de transport repose cependant sur une abstraction des réseaux existants : des arcs virtuels et les coûts associés sont définis et calibrés pour chaque paire de zones. Le niveau de résolution géographique de ce modèle montre qu'il est possible de pouvoir définir des modèles d'équilibre général calculable à grande échelle. Sous réserve de disposer de bases de données détaillées pour la mise en œuvre de tel systèmes, nous pensons possible de pouvoir développer des modèles OST qui intègrent finement les liens et échanges avec le « reste du monde ». Bröcker et Mercenier (2011) discutent de la manière de faire converger modèle macroéconomique d'ensemble et modèles OST dans un cadre unifié. Le problème majeur pour toute application empirique est celui afférent aux données.

4 Calibrage, validation, simulation

Il est reconnu que les modèles OST sont particulièrement exigeants en termes de données statistiques nécessaire à leur mise en œuvre empirique. L'accès à des données de qualité est une condition nécessaire mais non suffisante. La collecte de données hétérogènes, leur assemblage et leur harmonisation sont des étapes critiques dans les trois dimensions que constituent le calibrage d'un modèle, sa validation et son utilisation à des fins de simulation.

Il est reconnu que n'importe quel modèle OST est gourmand en données nécessaire à sa mise en œuvre. La collecte de données, la préparation, l'assemblage, et l'harmonisation de ces dernières, est une étape critique dans la perspective d'utiliser cet outil pour des objectifs de simulation. Non seulement l'existence et la disponibilité de données détaillées concernant les agents économiques et les marchés modélisés est déjà en soi une difficulté à surmonter, mais il faut aussi garder à l'esprit que les sources d'information sont disparates et qu'il convient d'harmoniser le tout. D'un point de vue empirique, cette dimension « données » peut rétroagir sur l'architecture du modèle OST considéré ou bien sur le besoin de disposer de plusieurs de ces modèle pour être le mieux à même d'interpréter le résultat de scénarios à tester. Notre avis est que cet aspect de la modélisation n'est pas à négliger.

4.1 Information statistique

La première des démarches à entreprendre, aussi évidente soit-elle, est la collecte et la sélection de données statistiques pertinentes pour le modèle.

Il s'agit d'identifier les données requises, leurs provenances et ce qu'elles mesurent avant même de penser à leur mise en forme et leur harmonisation.

Une première clé d'unification de ces sources d'information hétérogène repose sur la définition d'un niveau de granularité géographique commun. Le plus petit dénominateur commun utile à l'harmonisation de toutes les bases de données détermine la précision géographique du modèle.

Une fois cette clé choisie, les données collectées doivent être en rapport avec les différents agents économiques, les marchés et les interactions considérés. Sans prétendre à l'exhaustivité, ces données doivent être à même de caractériser les demandes et offres des individus et leurs ménages, des entreprises et leurs établissements, des aménageurs, des promoteurs et des constructeurs sur :

- les marchés du travail : pour chaque zone géographique, emploi par secteur d'activité, par type de métier; salaire par secteur et type de métier, nombre de firmes et d'établissements par secteur ;
- les marchés des biens et services: pour chaque zone géographique, production et consommation par type de produit et service ; relation intra- et inter-industrie ;
- les marchés du foncier : occupation du sol par mode, mutation des modes d'occupation du sol ;
- les marchés de l'immobilier: offre et demande de surfaces pour différent types de biens immobiliers (logements, bureau, magasins, entrepôts) par statut d'occupation ; prix de transaction de ces biens différenciés; données sur la construction et la démolition ;
- les marchés du transport : réseaux de transport par modes, niveaux de service (vitesses, distances, nœuds), données de trafic.

En parallèle, la plupart des modèles LUTI désagrègent les populations d'acteurs en sous-groupes. Il convient dès lors de pouvoir disposer de données qui permettent de caractériser les aspects démographiques des acteurs (formation des ménages, naissance et mort des entreprises, migrations, distribution des revenus, etc.). L'objectif est de caractériser l'hétérogénéité des offres et demandes des acteurs sur les différents marchés à différentes dates et en différents endroits.

Toutes ces dimensions ont besoin de données à différents niveaux d'agrégation, différentes dates, ce pour différents objectifs.

À l'exception des données issues de recensements, beaucoup sont difficiles à obtenir. En particulier, les données d'enquêtes auprès d'individus, de registres d'entreprises et d'établissements, les données détaillées concernant les plans locaux d'urbanisme, sont assez difficiles à obtenir et très dépendantes du cadre d'étude. C'est aussi le cas des données relatives au marché des transports et ses acteurs.

Il faut garder à l'esprit les contraintes que font peser les données sur la portée des résultats produits par un modèle LUTI, voire sur la nécessité d'adapter la structure de ce modèle à ces données.

4.2 La boucle données-modèle

L'écart entre la souche théorique d'un modèle et les données disponibles pour sa mise en œuvre conduisent à réviser soit la stratégie de collecte des données soit la formulation du modèle. Cette dernière peut prendre la forme d'une simplification des hypothèses relatives aux comportements des acteurs, à la définition des marchés sur lesquels ils interviennent, aux relations qui les unissent. Elle peut aussi prendre la forme d'une modification plus profonde de la structure du modèle, ce qu'elle quantifie, et de sa portée.

Il n'y a pas vraiment de démarche optimale pour répondre au problème de la boucle données-modèle. Pour autant, quelques règles de bonne pratique semblent s'imposer : CITER.

Une fois les données collectées, il reste à les préparer et les harmoniser pour l'estimation, le calibrage, la validation et l'utilisation du modèle à des fins de simulation.

Ces données provenant de sources variées et à des niveaux d'agrégation divers, l'idée est de trouver une métrique commune et cohérente pour l'exploitation de ces données dans la cadre de la mise en œuvre du modèle LUTI. À ce titre, il convient de s'assurer que :

- il y a concordance entre les mesures d'une même quantité : même nomenclature, même champ statistique, possibilité d'utiliser une définition commune ;
- il y a possibilité de collecter toutes les données nécessaires à différentes périodes, de préférence éloignées pour éviter un maximum les phénomènes de dépendance à l'état antérieur et pour vérifier si le modèle utilisé peut répondre à des changements structurels dans les comportements des acteurs et les marchés modélisés ;
- la définition des scénarios reposent sur la disponibilité de données pour l'exercice de simulation à l'horizon souhaité, du moins reposent sur un ensemble d'hypothèses claires.

5 Quelques recommandations

L'existence de nombreuses architectures, chacune possédant ses avantages et limites, suggère d'éviter de présupposer tel ou tel modèle comme étant « plus adéquat » ou « meilleur » qu'un autre. Au contraire, nous plaidons pour une étude plus approfondie de leurs caractéristiques techniques et pour une meilleure connaissance de leurs portée et limites.

5.1 Sensibilité aux formulations mathématiques et aux variables utilisées

Un point assez peu discuté est celui de la formulation mathématique des différents éléments du modèle et des variables utilisées. L'enchevêtrement des différents blocs d'un modèle LUTI, la manière dont les variables pertinentes qui permettent d'assurer la transition d'un bloc à l'autre, sont des points clé dans l'interprétation des résultats.

5.2 Sensibilité aux hypothèses

Tous les modèles LUTI ne couvrent pas l'ensemble des marchés et acteurs qui entrent en jeu. Certains ne s'intéressent qu'à une partie du problème et constituent donc des modèles conditionnels à un état particulier de ce qui n'est pas modélisé. Il convient d'identifier ce qui n'est pas modélisé, d'en dresser un inventaire précis et d'énoncer clairement quelles sont les incidences sur les résultats attendus.

De la même manière pour ce qui est modélisé, il convient d'énoncer clairement quels sont les règles et les interactions entre les acteurs et les mécanismes d'équilibrage des marchés. On notera aussi certains problèmes récurrents dans la modélisation du marché des transports :

- peu de prise en compte des contraintes de capacité dans les transports en commun ;
- calcul d'indicateurs de performance des réseaux de transports en commun reposant souvent sur des moyennes d'itinéraires ;
- l'intermodalité et le stationnement ne sont que très rarement modélisés alors que ce sont des déterminants potentiels de l'organisation des déplacements ;
- formes mathématiques ne permettant aucune interprétation claire des préférences et technologies des agents économiques.

5.3 Sensibilité aux données

Une attention particulière doit être portée sur les données utilisées et ce à quoi elles servent. N'importe quel modèle LUTI est particulièrement sensible à ce problème et les résultats qu'il produit en dépendent fortement. Il convient pour chaque application d'un modèle :

- de dresser un inventaire précis des données à disposition, de leur définition, et de leur harmonisation dans la mise en œuvre du modèle, que ce soit pour une période spécifique ou plusieurs (notamment pour validation et simulation) ;
- d'envisager d'avoir à disposition à nouveau des mêmes données pour une mise à jour ultérieure du modèle et donc de faire face à des changements de nomenclature ;
- d'impliquer au mieux les producteurs de données.

5.4 Flexibilité

Idéalement, on attend d'un modèle LUTI qu'il soit flexible à trois titres :

- le premier est qu'il soit possible de pouvoir le compléter lorsqu'il ne modélise pas l'ensemble des interactions en jeu ;
- le second est qu'il soit possible de pouvoir substituer certains de ses blocs avec d'autres plus adaptés au cas d'étude ;
- le troisième est qu'il soit possible de pouvoir modifier la formulation mathématique des comportements modélisés et des procédures de rencontres entre offres et demandes sur les marchés considérés.

5.5 Transparence

Bien entendu, nous plaidons en faveur de la nécessité de pouvoir comprendre précisément l'articulation du modèle. Toute l'information sur sa construction et sa mise en œuvre doit être disponible et il doit être possible de pouvoir décomposer avec précision toute l'architecture du système.

5.6 Comparaison entre modèles

Le fait de vouloir privilégier un modèle plus qu'un autre pour une étude de cas apparaît plus comme une question de croyances a priori que comme une question de pertinence des résultats pouvant être produits.

Notre opinion sur ce point est qu'il apparaît nécessaire de pouvoir comparer plusieurs approches dans un même cadre afin d'être à même de produire des éventails de résultats et de mettre en perspective l'aspect absolutiste d'un résultat particulier provenant d'un modèle particulier.

Références bibliographiques

Anas, A. et Y. Liu (2007), A Regional Economics, Land Use and Transportation (RELU-TRAN) model: formulation, algorithm, design and testing, *Journal of Urban Economics*, Vol. 47(3), pp. 415-455

Anas, A. (1994) METROSIM: A Unified Economic Model of Transportation and Land-Use

Alex Anas & Associates, Williamsville, NY

Anas, A. (1998) NYMTC Transportation Models and Data Initiative: The NYMTC Land Use Model

Anderstig, C., Mattsson, L.-G., (1991) An integrated model of residential and employment location in a metropolitan region *Papers in Regional Science*, 70, 167-84.

Anderstig, C., Mattsson, L.-G. (1998) Modelling land-use and transport interaction: evaluations and policy analysis. In: *Network Infrastructure and the Urban Environment: Recent Advances in Land-Use/Transportation Modelling* (L. Lundqvist, L.-G. Mattsson, T.J. Kim, eds.), 308-328. Springer, Berlin/Heidelberg/New York

Barrett, C.L. et al. (1999) TRansportation ANalysis SIMulation System (TRANSIMS). Version TRANSIMS-LANL-1.0. Volume 0: Overview. LA-UR 99-1658. Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, NM. http://transims.tsasa.lanl.gov/PDF_Files/Vol0-jmhF_990602_.pdf

Batty, M. (1994) A chronicle of scientific planning: the Anglo-American modeling experience, *Journal of the American Planning Association*, 60, 7-16

Batty, M. (1997) Cellular automata and urban form: a primer *Journal of the American Planning Association*, 63, 264-274.

Batty, M. and Xie, Y. (1994) From cells to cities *Environment and Planning B: Planning and Design*, 21, 31-48

Boyce, D.E. (1988) Renaissance of large-scale models *Papers of the Regional Science Association*, 65, 1-10

Boyce, D.E., Chon, K.S., Ferris, M.E., Lee, Y.J., Lin, K.T., Eash, R.W. (1985) Implementation and Evaluation of Combined Models of Urban Travel and Location on a Sketch Planning Network, Working Paper. Department of Civil Engineering, University of Illinois and Chicago Area Transportation Study, Urbana-Champaign/Chicago, IL

Boyce, D.E., Chon, K.S., Lee, Y.J., Lin, K.T., LeBlanc, L. (1983) Implementation and computational issues for combined models of location, destination, mode, and route choice. *Environment and Planning A*, 15, 1219-30

Boyce, D.E., LeBlanc, L.J., Chon, K.S., Lee, Y.L., Lin, K.T. (1981) Combined Models of Location, Destination, Mode and Route Choice: A Unified Approach Using Nested Entropy Constraints, Publication No. 3. Transportation Planning Group, Department of Civil Engineering, University of Illinois, Urbana, IL

Boyce, D., Mattsson, L.-G. (1991) Modeling residential location choice in relation to

housing location and road tolls on congested urban highway networks: *Transportation Research B* 33, 581-591

Boyce, D.E., Tatineni, M., Zhang, Y. (1992) Scenario Analyses of the Chicago Region with a Sketch Planning Model of Origin-Destination Mode and Route Choice Report to Illinois Department of Transportation. Urban Transportation Center, University of Illinois, Chicago, IL

Bröcker, J. (1998), Spatial effects of Transeuropean Networks: preliminary results from a spatial computable general equilibrium analysis, document de travail, Université de Kiel

Bröcker, J. et J. Mercenier (2011), General equilibrium models for transportation economics. In A. de Palma, R. Lindsey, E. Quinet, and R. Vickerman, editors, *Handbook of transport economics*, Chapter 2. Edward Elgar, Cheltenham.

Caindec, E.K., Prastacos, P. (1995) A Description of POLIS. The Projective Optimization Land Use Information System Working Paper 95-1. Association of Bay Area Governments, Oakland

Clarke, G.P., ed. (1996) *Microsimulation for Urban and Regional Policy Analysis* European Research in Regional Science 6. Pion, London

de la Barra, T. (1982) Modelling regional energy use: a land use, transport and energy evaluation model *Environment and Planning B: Planning and Design*, 9, 429-443

de la Barra, T. (1989) *Integrated Land Use and Transport Modelling* Cambridge University Press, Cambridge

de la Barra, T. (1998) Improved logit formulations for integrated land use, transport and environmental models. In: *Network Infrastructure and the Urban Environment: Recent Advances in Land-Use/Transportation Modelling* (L. Lundqvist, L.-G. Mattsson, T.J. Ki, eds.), 288-307 Springer, Berlin/Heidelberg/New York

de la Barra, T., Pérez, B. Vera, N. (1984) TRANUS-J: Putting large models into small computers *Environment and Planning B: Planning and Design*, 11, 87-101

Echenique, M.H. (1985) The use of integrated land use transportation planning models: the cases of Sao Paulo, Brazil and Bilbao, Spain. In: *The Practice of Transportation Planning* (M. Florian, ed.) Elsevier, The Hague

Echenique, M.H., Crowther, D., Lindsay, W. (1969) A spatial model for urban stock and activity *Regional Studies*, 3, 281-312

Transport Reviews, 10, 309-322

Echenique, M.H., Williams, I.N. (1980) Developing theoretically based urban models for practical planning studies *Sistemi Urbani*, 1, 13-23

Ferrand, N. (2000) Multi-reactive agents paradigm for spatial modelling. In: *Spatial Models and GIS: New Potential and New Models* (A.S. Fotheringham, M. Wegener, eds.), 176- 184. Taylor & Francis, London

Geraldes, P., Echenique, M.H., Williams, I.N. (1978) A spatial economic model for Bilbao. In: *Proceedings of the PTRC Summer Annual Meeting*, 75-94. PTRC, London

Hayashi, Y., Tomita, Y. (1989) A micro-analytic residential mobility model for assessing the effects of transport improvement. In: *Transport Policy, Management and*

Technology - Towards 2001, Selected Proceedings of the Fifth World Conference on Transport Research, Yokohama, 91-105 Western Periodicals, Ventura, CA

Hensher, D., Ton, T. (2001) TRESIS: A transportation, land use and environmental strategy impact simulator for urban areas. Paper presented at the 8th World Conference on Transport Research, Seoul.

Hunt, J.D. (1994) Calibrating the Naples land-use and transport model. *Environment and Planning B: Planning and Design* 21, 569-90

Hunt, J.D., Abraham, J.E. (2003) Design and application of the PECAS land use modelling system. Paper presented at the 8th International Conference on Computers in Urban Planning and Urban Management, Sendai, Japan.

Hunt J.D., Echenique, M.H. (1993) Experiences in the application of the MEPLAN framework for land use and transport interaction modeling. In: *Proceedings of the 4th National Conference on the Application of Transportation Planning Methods*, 723-754 Daytona Beach, FL

Hunt, J.D., Simmonds, D.C. (1993) Theory and application of an integrated land-use and transport modelling framework. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 20, 221- 44

Kim, T.J. (1989) *Integrated Urban Systems Modeling: Theory and Applications* Kluwer, Dordrecht

Landis, J.D. (1992) BASS II: A New Generation of Metropolitan Simulation Models. Working Paper 573 Institute of Urban and Regional Development, University of California, Berkeley, CA

Landis, J.D. (1993) CUF Model Simulation Results: Alternative Futures for the Greater Bay Area Region. Working Paper 592 Institute of Urban and Regional Development, University of California, Berkeley, CA

Landis, J.D. (1994) The California Urban Futures Model: a new generation of metropolitan simulation models *Environment and Planning B: Planning and Design*, 21, 399-422

Landis, J.D., Zhang, M. (1998a) The second generation of the California urban futures model. Part 1: Model logic and theory *Environment and Planning B: Planning and Design*, 25, 657-666

Landis, J.D., Zhang, M. (1998b) The second generation of the California urban futures model. Part 2: Specification and calibration results of the land-use change submodel *Environment and Planning B: Planning and Design*, 25, 795-824

Lowry, I.S. (1964) *A Model of Metropolis*.

Mackett, R.L. (1983) *The Leeds Integrated Land-Use Transport Model (LILT)*. Supplementary Report SR 805 Transport and Road Research Laboratory, Crowthorne, Berkshire

Mackett, R.L. (1985a) Integrated land use transport models *Transport Reviews*, 5, 325-343

Mackett, R.L. (1985b) Micro-analytical simulation of locational and travel behaviour. In: *Proceedings of the PTRC Summer Annual Meeting*, 175-188. PTRC, London

Mackett, R.L. (1990a) MASTER Model (Micro-Analytical Simulation of Transport, Employment and Residence). Report SR 237 Transport and Road Research Laboratory, Crowthorne, Berkshire

Mackett, R.L. (1990b) Comparative analysis of modelling land-use transport interaction at the micro and macro levels. *Environment and Planning A*, 22, 459-75

Mackett, R.L. (1990c) The systematic application of the LILT model to Dortmund, Leeds and Tokyo *Transport Reviews*, 10, 323-38

Mackett, R.L. (1991a) A model-based analysis of transport and land-use policies for Tokyo. *Transport Reviews*, 11, 1-18

Mackett, R.L. (1991b) LILT and MEPLAN: a comparative analysis of land-use and transport policies for Leeds *Transport Reviews*, 11, 131-54

Martinez, F.J. (1991) Transport investments and land values interaction: the case of Santiago City. In: *Proceedings of the PTRC Summer Annual Meeting*, 45-58. PTRC, London 16

Martinez, F.J. (1992a) Towards the 5-stage land-use transport model. In: *Land Use, Development and Globalisation, Selected Proceedings of the Sixth World Conference on Transport Research*, 79-90 Lyon, St.-Just-la-Pendue: Presse de l'Imprimerie Chirat

Martinez, F.J. (1992b) The bid-choice land-use model: an integrated economic framework *Environment and Planning A*, 24, 871-85

Martinez, F.J. (1996) Analysis of urban environmental policies assisted by behavioural modelling. In: *Transport, Land Use and the Environment* (Y. Hayashi, J. Roy, eds.), 233-257. Kluwer, Dordrecht

Martinez, F.J. (1997a) Towards a microeconomic framework for travel behavior and land use interactions. Paper presented at the 8th Meeting of the International Association of Travel Behavior Research, Austin, TX.

Martinez, F.J. (1997b) MUSSA: A Land Use Model for Santiago City Department of Civil Engineering, University of Chile, Santiago

Martinez, F.J., Donoso, P.P. (1995) MUSSA model: the theoretical framework. In: *World Transport Research. Proceedings of the 7th World Conference on Transportation Research* (D.A. Hensher, J. King, eds.), Vol. 2. Pergamon, Oxford

Miller, E.J., Kriger, D.S., Hunt, J.D., Badoe, D.A. (1998) *Integrated Urban Models for Simulation of Transit and Land-Use Policies. Final Report*, TCRP Project H-12. Joint Program of Transportation, University of Toronto, Toronto

Miller, E.J., Salvini, P.A. (2001) The Integrated Land Use, Transportation, Environment (ILUTE) Microsimulation Modelling system: Description and current status. In: *The Leading Edge in Travel Behaviour Research* (D.A. Henscher, ed.), Selected Papers from the 9th International Association for Travel Behaviour Research Conference, Gold Coast, Queensland, Australia.

Miyamoto, K., Kitazume, K. (1989) A land-use model based on random utility/rent-bidding analysis (RURBAN). In: *Transport Policy, Management and Technology - Towards 2001, Selected Proceedings of the Fifth World Conference on Transport Research*, Yokohama, Vol. IV, 107-21. Western Periodicals, Ventura, CA

Miyamoto, K., Nakamura, H., Shimizu, E. (1986) A land use model based on

disaggregate behavioral analyses In: Proceedings of the Fourth World Conference on Transport Research, 1535-50.

Miyamoto, K., Udomsri, R. (1996) An analysis system for integrated policy measures regarding land use, transport and the environment in a metropolis. In: Transport, Land Use and the Environment (Y. Hayashi, J. Roy, eds.), 259-280. Kluwer, Dordrecht

ODOT - Oregon Department of Transportation (2002)
<http://www.odot.state.or.us/tddtpau/modeling.html>

Pfaffenbichler, P.C., Shepherd, S.P. (2002) A dynamic model to appraise strategic land-use and transport policies. European Journal of Transport and Infrastructure Research, 2, 255-283

Prastacos, P. (1986) An integrated land-use-transportation model for the San Francisco region. Environment and Planning A, 18, 307-322 and 511-528

Putman, S.H. (1983) Integrated Urban Models: Policy Analysis of Transportation and Land Use Pion, London

Putman, S.H. (1991) Integrated Urban Models 2. New Research and Applications of Optimization and Dynamics Pion, London

Putman, S.H. (1998) Results from implementation of integrated transportation and land use models in metropolitan regions. In: Network Infrastructure and the Urban Environment: Recent Advances in Land-Use/Transportation Modelling (L. Lundqvist, L.-G. Mattsson, T.J. Kim, eds.), 268-287. Springer, Berlin/Heidelberg/New York

Rho, J.H., Kim, T.J. (1989) Solving a three-dimensional urban activity model of land use intensity and transport congestion Journal of Regional Science, 29, 595-613

Simmonds, D.C., Still, B.G. (1998) DELTA/START: Adding land use analysis to integrated transport models. Paper presented at the 8th World Conference on Transport Research, Antwerpen.

Simmonds, D.C. (1999) The Design of the DELTA land-use modelling package Environment and Planning B: Planning and Design, 26, 665-684.

Simmonds D (2001) The objectives and design of a new land-use modelling package: DELTA In: Regional Science in Business (G.P. Clarke, M. Madden, eds.), 159-188. Springer, Berlin/Heidelberg

Waddell, P. (1998a) An urban simulation model for integrated policy analysis and planning: residential location and housing market components of UrbanSim. Paper presented at the 8th World Conference on Transport Research, Antwerpen.

Waddell, P. (1998b) UrbanSim Overview: <http://urbansim.org>. Waddell, P. (2002) UrbanSim: Modeling urban development for land use, transportation and environmental planning Journal of the American Planning Association, 68, 297-314

Waddell, P., Moore, T., Edwards, S. (1998) Exploiting parcel-level GIS for land use modeling. In: Proceedings of the ASCE Conference on Transportation, Land Use and Air Quality: Making the Connection. ASCE, Portland, OR Webster, F.V., Bly, P.H.,

Wegener, M. (1982a) A multilevel economic-demographic model for the Dortmund region. Sistemi Urbani, 3, 371-401

Wegener, M. (1982b) Modeling urban decline: a multilevel economic-demographic

model of the Dortmund region *International Regional Science Review*, 7, 21-41

Wegener, M. (1985) The Dortmund housing market model: A Monte Carlo simulation of a re- gional housing market. In: *Microeconomic Models of Housing Markets* (K. Stahl, ed.), *Lecture Notes in Economic and Mathematical Systems* 239, 144-191. Springer, Berlin/Heidelberg/New York

Wegener, M. (1986a) Transport network equilibrium and regional deconcentration *Environment and Planning A*, 18, 437-56

Wegener, M. (1986b) Integrated forecasting models of urban and regional systems. In: *Integrated Analysis of Regional Systems* (P.W.J. Batey, M. Madden, eds.). *London Papers in Regional Science* 15, 9-24.

Wegener, M. (1987) Transport and location in integrated spatial models. In: *Transportation Planning in a Changing World* (P. Nijkamp, S. Reichman, eds.), 208-225. Gower, Alder- shot

Wegener, M. (1996) Reduction of CO2 emissions of transport by reorganisation of urban activi- ties. In: *Transport, Land Use and the Environment* (Y. Hayashi, J. Roy, eds.), 103-124. Kluwer, Dordrecht

Wegener, M. (1998b) The IRPUD Model: Overview. <http://irpud.raumplanung.uni-dortmund.de/irpud/pro/mod/mod.htm>

Wegener, M., Mackett, R.L., Simmonds, D.C. (1991) One city, three models: comparison of land-use/transport policy simulation models for Dortmund *Transport Reviews*, 11, 107-29

Wegener, M., Spiekermann, K. (1996) The potential of microsimulation for urban models. In: *Microsimulation for Urban and Regional Policy Analysis* (G. Clarke, ed.), 146-163. Euro- pean Research in Regional Science 6. Pion, London:

Wegener, M., 2004, Overview of land use transport models, in David A. Hensher and Kenneth Button (Eds.): *Transport Geography and Spatial Systems. Handbook 5 of the Handbook in Transport*. Pergamon/Elsevier Science, Kidlington, UK, pp. 127-146.

White, R., Engelen, G. (1994) Cellular dynamics and GIS: modelling spatial complexity *Geo- graphical Systems*, 1, 237-253

Williams, I.W. (1994) A model of London and the South East *Environment and Planning B: Planning and Design*, 21, 535-53