

**Ministère de l'Équipement, des Transports,
de l'Aménagement du Territoire, du Tourisme et de la Mer**

DRAST



**PLATEFORME DE SIMULATION
POUR L'ÉTUDE PROSPECTIVE DE LA MOBILITÉ
URBAINE DES AGGLOMÉRATIONS FRANÇAISES
ET EUROPÉENNES**

MobiSim SMA

Structure et algorithmes du modèle

ATNSA
Application de Techniques Nouvelles
15, Rue du Louvre 75001 PARIS
Tél. 01 53 40 52 20 Fax. 01 53 40 52 25



Les travaux de recherche MobiSim SMA ont été conduits par :

Société ATN

Philippe CASANOVA

Vladimir KOLTCHANOV

Matthieu LEGOUT

Yann MARTINEAU

Experts associés

Guillaume FABUREL, Université Paris XII

Pierre FRANKHAUSER, Université de Franche-Comté

Charles RAUX, LET

Jean-Louis ROUTHIER, LET

Marc WIEL, urbaniste

Ils ont été suivis par le **comité de pilotage** composé de :

Jacques BOUGNOL, CETE Ouest

Loïc BOURRIQUEN, AUDIAR

Odile BREHIER, CETE Ouest

Gérard BRUN, DRAST

Isabelle CABANNE, CERTU

Mathieu GOETZKE, DRAST

Anne GRENIER, ADEME

Christian LEBONDIDIER, CERTU

Sommaire

1. PREAMBULE.....	4
LE PROJET MOBISIM SMA	6
2. LE PROJET MOBISIM SMA : INTRODUCTION.....	6
LE MODELE MOBISIM SMA	6
3. ARCHITECTURE DU MODELE MOBISIM SMA	6
4. REPRESENTATION SPATIALE, AGENTS ESPACE ET MAILLES.....	6
5. AGENTS MENAGES	6
6. AGENTS ENTREPRISES.....	6
7. MARCHE DE L'EMPLOI.....	6
8. MARCHE IMMOBILIER	6
9. AGENTS STATIQUES.....	6
10. MODELISATION DES DEPLACEMENTS QUOTIDIENS.....	6
11. TABLEAU DE BORD « MOBILITE URBAINE ET DEVELOPPEMENT DURABLE ».....	6
12. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	6
LA PLATEFORME MOBISIM SMA.....	6
13. IMPLEMENTATION DES SCENARIOS.....	6
14. CONCLUSION / PERSPECTIVES.....	6

1. PREAMBULE

1.1. STRUCTURE DU DOCUMENT

Le présent document établi comme rapport final du projet MobiSim SMA à destination de la DRAST dans le cadre du programme de recherche du PREDIT (DRAST / ADEME), vise un triple objectif :

1. rappeler en introduction les grandes lignes du projet MobiSim SMA :
 - la **problématique** de recherche (analyse des interactions entre mobilité et morphologie urbaines pour l'étude prospective de la mobilité),
 - le **contexte** dans lequel le projet MobiSim SMA a été développé,
 - et les **objectifs opérationnels** poursuivis (en particulier, être en mesure de tester différents scénarios du type SCoT pour des agglomérations françaises et européennes) ;
2. réunir les travaux de recherches menés pour la conception du modèle MobiSim SMA :
 - la description de l'**architecture générale** du modèle MobiSim SMA,
 - la définition précise des **algorithmes** qui régissent le **comportement des agents** qui interagissent dans MobiSim SMA,
 - et la formulation explicite des **hypothèses** de modélisation retenues, cadre de l'exercice de projection ;
3. présenter en conclusion les étapes de réalisation et d'utilisation de la plateforme MobiSim SMA :
 - l'initialisation et le paramétrage du modèle à partir des **données de terrain (application à l'aire urbaine de Rennes)**,
 - le **développement informatique** (construction de la plateforme utilisable par des non modélisateurs),
 - le **calage** des différents algorithmes, les études de **sensibilité** et la **validation** du modèle global,
 - les **études de scénarios** du type SCoT au regard des indicateurs définis dans le **tableau de bord « mobilité urbaine et développement durable »**.

La partie centrale du document (parties numérotées de 4 à 11) décrit successivement les algorithmes qui régissent le comportement de chaque agent pris en compte dans le modèle :

- Les **Agents Espace** et l'action des **Agents Globaux** sur la dynamique de l'occupation du sol (partie 4) ;
- Les **Agents Ménages** (Démographie et choix de localisation / partie 5 ; Déplacements de personnes / partie 10) ;
- Les **Agents Entreprises** (Cycle de vie et stratégie de localisation / partie 6 ; Transport de marchandises / partie 10) ;
- Les **Agents Statiques** (Réseaux VP et TC / partie 9).

Les parties 7 et 8 détaillent respectivement l'organisation du marché de l'emploi et du marché

immobilier. La partie 11 décrit les indicateurs que nous utiliserons pour apprécier les politiques de transport au regard des critères du développement durable.

1.2. SYNTHÈSE

La mobilité urbaine est un des enjeux du développement durable. La plateforme de modélisation MobiSim SMA intègre les différents processus qui structurent l'aire urbaine afin d'étudier, de comprendre et de gérer l'évolution de la mobilité urbaine des agglomérations françaises et européennes à l'horizon 2025. MobiSim SMA est un modèle multi-agent qui repose sur la description des comportements de localisation et de déplacements des ménages et des entreprises.

Le modèle distingue plusieurs types d'agents : les Agents Dynamiques (Ménages et Entreprises), les Agents Statiques (infrastructures routières et réseaux de transport en commun), les Agents Espace (zones statistiques ou administratives et mailles spatiales) et les Agents Globaux (décideurs politiques, gestionnaires de réseaux, groupes de pression ...). Les Agents Dynamiques évoluent au pas de temps annuel en taille, nombre, localisation et activité. Le modèle prend en compte les événements démographiques (naissances, morts, mises en couple, séparations, émancipation des enfants), les transitions économiques des individus (activité/inactivité, emploi/chômage), les choix résidentiels des ménages, les scénarios macro-économiques (taux de chômage, évolution de l'âge de fin d'études, comportement de maternité et de cohabitation), la stratégie de localisation des entreprises, le marché immobilier et le marché de l'emploi. Les Agents Statiques caractérisent les offres de transport VP et TC (connections, longueurs, vitesses, capacités et prix). Les Agents Espace font référence aux différentes zones urbaines caractérisées par les aménités qu'elles proposent. L'attractivité de la zone dépend pour chaque ménage ou entreprise des préférences de l'agent dynamique considéré ; ce calcul prend en compte divers critères tels que les prix immobiliers, le cadre de vie, l'accessibilité aux aménités rurales et urbaines, et la qualité des infrastructures de transport. Un maillage fin (500 m par 500 m) permet de prendre en compte la dynamique de l'occupation du sol, résultat des actions des Agents Globaux.

L'évaluation de la mobilité urbaine prend en compte les déplacements de personnes et le transport de marchandises en ville générés par les activités économiques. Le calcul des déplacements suit le modèle classique à quatre étapes : génération des programmes d'activités hebdomadaires des ménages, génération des boucles de déplacements individuels, choix modal (VP, TC et modes doux), affectation d'itinéraires. Le modèle reporte pour chaque mode motorisé (VP / TC) les durées, les distances et les coûts des différents trajets dans des matrices Origine-Destination. Ces calculs prennent en compte la congestion en utilisant des courbes débit/vitesse pour chaque tronçon. Les matrices ainsi obtenues sont utilisées au pas de temps suivant pour déterminer le choix modal des différents usagers. A partir des déplacements, le modèle calcule les émissions générées (gaz à effet de serre, polluants, bruit) sur la base du modèle COPERT.

Afin de tester les politiques d'aménagement du territoire et de transport urbain, un tableau de bord « Mobilité urbaine et développement durable » évalue différents indicateurs qui explorent les aspects économiques, sociaux et environnementaux de la mobilité. Différentes stratégies seront implémentées dans la plateforme et l'utilisateur pourra construire son propre scénario en combinant des mesures telles que la mise en place d'un péage urbain, le développement d'infrastructures routière ou de transport en commun, des mesures d'incitation à des choix cohérents de localisation, la construction de nouveaux logements, etc.

Le projet est en partie subventionné par le Ministère français des Transports et de l'Équipement et par l'ADEME dans le cadre du PREDIT. Le modèle sera appliqué dans un premier temps à l'aire urbaine de Rennes. Ce premier cas concret met en scène 200 000 ménages (environ 500 000 habitants) évoluant sur environ 150 zones urbaines.

1.3. ABSTRACT

Urban Mobility is a key issue of sustainable development. The modelling shell MobiSim SMA aims to integrate the diverse processes that structure urban areas in order to study, understand and manage the dynamics of urban mobility in French and European cities for the next twenty years. MobiSim SMA is a multi-agent model mainly based on the description of household and enterprise behaviours.

Several agent types are distinguished: dynamic agents (households and enterprises), static agents (road infrastructure and public transportation networks), spatial agents (urban zones) and global agents (institutional managers, lobbying groups, transport associations). The dynamic agents evolve at a yearly time-step in size, number, location in urban area and activities. The model takes into account the demographic events (birth, death, marriage and divorce, child emancipation), the economic transitions of individuals (activity/inactivity, work/unemployment), the residential choices of households, macro-economic scenarios (unemployment rate, long-term trends in education, motherhood and cohabitation behaviour), the location strategy of enterprises, and housing and labour markets. The static agents characterize the offer of road and public transportation (connexions, length, capacity and prices). The spatial agents refer to the different urban zones and their amenities that help to calculate zone's attractiveness for each household or enterprise depending on its own characteristics. The attractiveness depends on several factors: the cost of housing, the environmental quality, the accessibility of urban amenities, and the supply and quality of transportation services (frequency and comfort). Global agents can decide to modify amenities in each zone (urbanism) as well as to act on road networks and public transportation offer (transport policies).

For each year, the model simulates household activity programs and calculates people displacements and good transports. It gives an overview of congestion and estimates total demand for each mode (road, public transportation and light modes). People fluxes are generated by the demand for mobility by objective and by zone on the basis of transport supply (possible distance and maximal speed). Flux intensity compared to system capacity decreases the speed of displacement. The increase in travel time is an important factor to determine modal choices (by private car, by route's collective transports, by railway's collective transports or by light modes). Environmental quality is partly linked to urban mobility, to displacements and to flux intensity. These factors affect the quality of the air (noises and atmospheric pollution due to transport activities) and the land use (housing, transportation networks and infrastructures, employment areas, natural spots ...) through the location choices of households and enterprises and through global agent decisions.

To test urban policies with the criteria of sustainable development, a board of indicators will be developed to present the results of city management in terms of economical, ecological and social indices. Different strategies will be implemented in the modelling shell as urban toll, public transportation development and coherent location incitements.

The project is partly funded by the French Ministry of Transport (PREDIT) and by the French Agency for Environment and Energy Management (ADEME), and the model is built in order to test the French policies on urban and transport development. It will be first applied to Rennes urban area (French Brittany). This concrete case will stage about 200.000 households (500.000 peoples) on 150 urban zones.

LE PROJET MOBISIM SMA

Cette partie introductive a pour objet de définir le cadre de développement du projet MobiSim SMA et les objectifs opérationnels du modèle.

2. LE PROJET MOBISIM SMA : INTRODUCTION

Le but de cette introduction est d'abord de brosser le portrait de notre problématique d'étude en résumant les enjeux des politiques de transport et d'aménagement du territoire pour le développement des villes françaises et européennes à l'horizon 2025, et de positionner le projet MobiSim SMA dans l'état de l'art des recherches intégrées Transport – Urbanisme ; il s'agit ensuite d'explicitier les choix stratégiques du modèle MobiSim SMA en replaçant cette étude dans son contexte (évolution du projet MobiSim des concepts de dynamique des systèmes au développement d'un modèle multi-agent) ; nous expliciterons enfin les objectifs opérationnels poursuivis et fixerons ainsi le cadre des applications et des études planifiées.

2.1. PROBLEMATIQUE

2.1.1. Tendances du développement urbain et de la mobilité dans les villes européennes

Commençons cette rapide perspective historique en redéfinissant la ville : la ville est une zone urbaine étendue et fortement peuplée (par opposition aux villages) dans laquelle se concentrent la plupart des activités humaines : habitat, commerce, industrie, éducation, politique, culture. La taille et la forme des villes ont évolué au cours des temps au fur et à mesure des progrès des transports. L'augmentation des vitesses de transports a progressivement étendu le rayon des villes. Si les villes féodales, à l'échelle du piéton, sont resserrées autour de leur centre, les murs de la ville sont peu à peu repoussés. A la Révolution industrielle, un fort exode rural accroît rapidement la population urbaine ; les déplacements motorisés (machine à vapeur, trains) favorisent le développement de banlieues. L'évolution des standards de vie au début du XX^{ème} siècle (voiture particulière, maison individuelle) accélère le processus d'étalement des villes. Les années 60 voient le paroxysme du paradigme « tout voiture » avec les projets de créations d'autoroutes urbaines et l'arrivée des autoroutes au cœur des villes. Mais, alors qu'une part croissante de la population est motorisée, des problèmes de congestion apparaissent. L'étalement urbain provoque de nombreux mouvements migratoires pendulaires et la prise de conscience des externalités de la mobilité pousse désormais à s'interroger sur un **développement urbain durable**.

Il s'agit aujourd'hui de **trouver des solutions d'organisation des transports et d'aménagement du territoire qui permettent de satisfaire les besoins de mobilité tout en limitant les externalités négatives en termes économiques, sociaux et environnementaux**.

2.1.2. Interactions entre mobilité et morphologie urbaines

La perspective historique et de nombreuses études de modélisation (Figure 1) mettent en évidence les interactions fortes entre système de transports et urbanisme, entre déplacements quotidiens et occupation du sol. Le législateur français en a pris note et l'instauration des schémas de cohérence territoriale (SCoT) traduit sa volonté d'agir en intégrant dans une même réflexion les deux aspects du système urbain :

Reconnaissant que l'offre de transports publics, l'offre routière et la stratégie de planification et de localisation de l'habitat, des activités et équipements urbains font système, la loi du 13 décembre 2000 relative à la solidarité et au renouvellement urbain (SRU) et la loi du 2 juillet 2003 Urbanisme et Habitat (UH) affirment la nécessité de conjuguer sur un même territoire

déplacements, habitat, développement économique et environnement. Ces lois préconisent l'élaboration de schémas de cohérence territoriale (SCoT) dans l'objectif de renforcer l'interaction des politiques urbaines et territoriales trop souvent traitées de manière sectorielles¹.

L'élaboration du SCoT « n'est pas une finalité en soi, mais une des étapes d'un processus global intégrant mise en œuvre, animation, suivi et évaluation ». Pour cela, nous considérons comme important de ... « mettre en place des outils de suivi et d'évaluation pour mieux comprendre les mutations, notamment en termes de mobilité, évaluer les effets des politiques mises en œuvre par rapport aux objectifs fixés dans le SCoT et constituer une aide à la décision pour les responsables chargés du développement du territoire ». MobiSim tente de répondre à cette attente.

L'élaboration du SCoT doit forger « une image réaliste, concrète et prospective du territoire ». Pour définir les grands choix stratégiques d'organisation et de développement d'un territoire, il faut élaborer et comparer « des scénarios prospectifs où Urbanisme et Déplacements s'articulent ». La construction des scénarios doit s'inscrire dans une démarche itérative et dynamique où **l'offre en transports ne doit pas être déterminée à posteriori**, en fonction de choix d'urbanisation définis a priori. La réalisation des choix stratégiques du SCoT s'appuie, entre autres, sur la maîtrise par les ménages de leurs besoins de déplacements en automobile. Il s'agit de prendre en compte, dans les modèles de simulation, l'évolution du comportement des ménages et les actions à mettre en œuvre pour les encourager à « rationaliser » leurs programmes de déplacements.

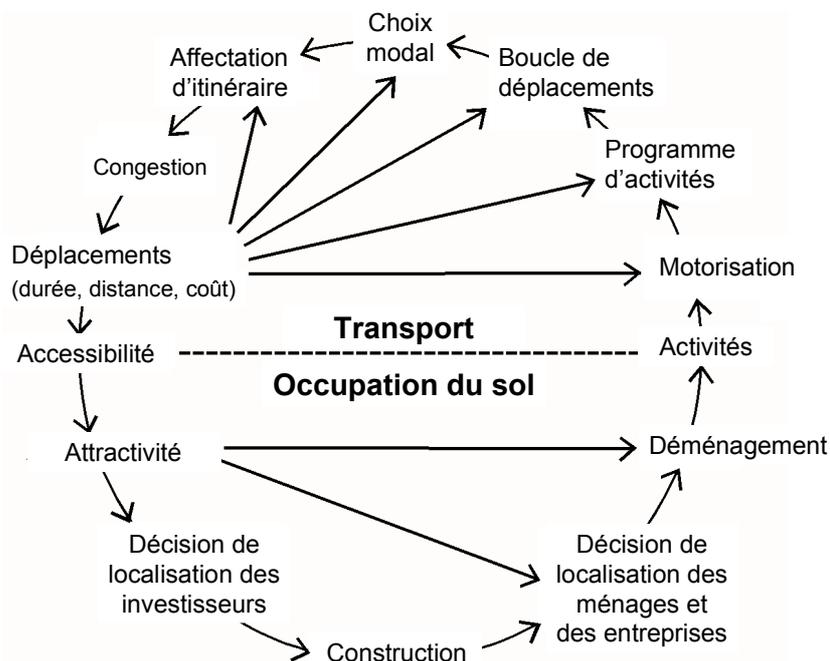


Figure 1. Les rétroactions entre système de transports et localisation (d'après PROPOLIS).

Les problèmes d'étalement urbain et de congestion ne sont pas réservés à la France. Entre autres, le projet européen PROPOLIS (Lautso et al. 2004) adresse les mêmes questions de durabilité de la mobilité urbaine. La problématique de l'interaction entre Transport et Urbanisme est actuellement riche de développements. Nous tentons dans le paragraphe suivant de positionner MobiSim par rapport aux autres études de modélisation effectuées dans le domaine.

¹ SCoT et déplacements. Problématique et méthodes. Coédition CERTU / ADEME 2004

2.1.3. Modèles intégrés d'occupation du sol et de système de transport

a. Etat de l'art en Amérique

Le continent Nord-américain s'intéresse aux études intégrées Transport – Urbanisme depuis de nombreuses années. Citons en particulier l'équipe du professeur Waddell à l'université de Washington qui a mis au point le modèle UrbanSim ; et le modèle canadien ILUTE (Integrated Land-Use Transportation Environment model). Ces deux modèles sont des modèles de microsimulation complètement désagrégés.

b. Modélisation en Europe

Différentes approches se sont développées en Europe ; citons en particulier :

- le modèle IRPUD, développé par Wegener à Dortmund (utilisé avec TRANUS et MEPLAN dans le projet PROPOLIS) est un modèle mésoscopique qui intègre Transport et Urbanisme en traitant de manière agrégée par zone ménages et emplois ;
- l'équipe de Guy Enguelen à Maastricht (RIKS) a mis au point des modèles couplés d'économie régionale et d'automates cellulaires pour traiter la dynamique de l'occupation du sol à l'échelle d'une région prenant en compte les infrastructures de transport (modèle initialement développé sur le territoire des Pays-Bas) ;
- les études de Kai Nagel (actuellement à Berlin) portent sur des modèles de microsimulation de transport et de simulation fine de trafic à l'échelle régionale notamment.

c. Positionnement du projet MobiSim SMA dans les recherches françaises

Plusieurs projets sont actuellement en cours de développement en France sur la thématique de la mobilité urbaine mais chacun avec ses spécificités :

- le modèle MIRO, développé par Banos et al. (ThéMA Besançon), modèle Multi-Agent de la Ville en Mouvement, s'intéresse aux déplacements de personnes au cours d'une journée dans les rues de la ville ;
- le projet SIMAURIF, développé par de Palma et al. (ThéMA Cergy-Pontoise, IAURIF, adpC) a pour objectif de coupler un modèle de trafic (METROPOLIS) et un modèle d'utilisation du sol (UrbanSim) dans le but de modéliser finement le trafic à l'échelle de l'agglomération parisienne, en simulant de façon agrégée les individus d'une zone ;
- le projet Simbad, en cours de développement par Nicolas et al. (LET, Lyon) a pour vocation de construire un modèle multi-agent de la mobilité urbaine dont les objectifs sont proches de ceux de MobiSim mais qui s'inscrit dans une dynamique de recherche plus fondamentale et à plus long terme.

La spécificité du modèle multi-agent MobiSim SMA est de comprendre les interactions entre Transport et Urbanisme à partir du comportement des Ménages et des Entreprises, et notamment de leurs choix en terme de mobilité et de localisation dans l'aire urbaine.

2.2. CONTEXTE

2.2.1. Historique du projet MobiSim

Le modèle MobiSim SMA est décliné du modèle MobiSim III dont l'évolution complexe du système est représentée de façon macroscopique au travers de boucles de rétroactions. Le modèle de simulation MobiSim III, développé par ATN et Collègues² a mis en évidence les relations d'interdépendance qui existent entre les différentes composantes de la mobilité : localisation des habitats, évolution de la population urbaine, localisation et développement des entreprises, capacité des réseaux de déplacements selon les modes TC, VP, Marche à pied et modes doux, les différents motifs de déplacements (domicile/travail, loisirs, école, services), Marchandises en ville, émissions relatives à ces déplacements. Pour des raisons tenant à la structuration des données disponibles, le modèle MobiSim III a été conçu sur un découpage spatial en 3 zones concentriques : ville centre, banlieue et périphérie.

MobiSim SMA est développé afin de dépasser les limites de MobiSim III, en particulier :

- **la structuration spatiale est affinée** : MobiSim III découpait la ville en 3 zones concentriques ; MobiSim SMA propose un double découpage spatial, l'un au niveau des zones IRIS, l'autre au niveau d'un maillage physique fin (500 ou 250 m de côté) ;
- **la population est désagrégée** : MobiSim III traitait les ménages de façon mésoscopique (nombre de ménages par zone) ; MobiSim SMA simule chaque ménage individuellement en intégrant son comportement en fonction de ses caractéristiques et de son environnement.

2.2.2. Apport de la modélisation multi-agent

Un agent est une entité physique ou virtuelle qui détient tout ou partie des caractéristiques suivantes : être capable d'agir dans un environnement, de communiquer directement avec d'autres agents, être mu par un ensemble de tendances qu'il cherche à optimiser, posséder des ressources propres, être capable de percevoir de manière limitée son environnement, tenter de satisfaire ses objectifs, en tenant compte des ressources et des compétences dont il dispose, et en fonction de sa perception, de ses représentations et des communications qu'il reçoit³.

Les Systèmes Multi-Agents (SMA) constituent une avancée importante dans l'univers de la Complexité par la prise en compte du comportement des agents et apportent ainsi une réponse particulièrement bien adaptée à l'analyse et à la résolution de problèmes impliquant plusieurs dimensions : spatiale, sociale, politique, organisationnelle, économique, financière. Cette approche permet de les appréhender, à la fois dans leur globalité et dans le détail des interactions locales entre les Agents impliqués. Dans ces systèmes, la « solution » n'est pas programmée explicitement mais **émerge** des interactions locales entre les agents simulés et leur environnement. L'intérêt des SMA est non seulement à caractère opérationnel mais aussi méthodologique, nous permettant de comprendre les situations à partir des comportements des agents qui construisent les dynamiques du système.

Appliquée à la problématique de la Mobilité Urbaine, la formalisation multi-agent permet de couvrir plusieurs domaines et champs d'application possibles :

- **Morphologie urbaine** : urbanisme / développement urbain ;
- **Géographie et dynamique spatiale** : mobilité quotidienne, choix résidentiels, politique foncière ;
- **Economie et gestion urbaine** : localisations des activités, des commerces ;
- **Transports** : demande de transport, choix modal, réseaux de transport intra-urbain.

² LET, Marc Wiel, Guillaume Faburel

³ Jacques Ferber : Les Systèmes Multi-Agents

2.2.3. Dynamique des systèmes et Systèmes multi-agents

Voici quelques points communs et différences entre l'approche Dynamique des systèmes (base conceptuelle du modèle MobiSim III) et l'approche SMA :

- La Dynamique des Systèmes représente l'évolution de systèmes complexes de façon macroscopique par des boucles de rétroactions (boucles structurantes), en prenant en compte la dimension temporelle et la non linéarité des relations entre les variables.
- L'approche SMA est une nouvelle lecture systémique, qui met en avant les multiples dimensions de l'interaction au sens large : la coopération, la compétitivité, l'encombrement etc., et leurs conséquences.
- L'approche SMA considère que l'action et l'interaction entre agents sont les éléments moteurs de la structuration d'un système complexe dans son ensemble.
- Des interactions entre agents émergent des structures organisées complexes qui, en retour, contraignent et modifient les comportements de ces agents et le système auquel ils appartient.
- L'approche SMA est adaptée à l'analyse d'interactions complexes entre agents et permet l'analyse plus fine de leurs comportements.

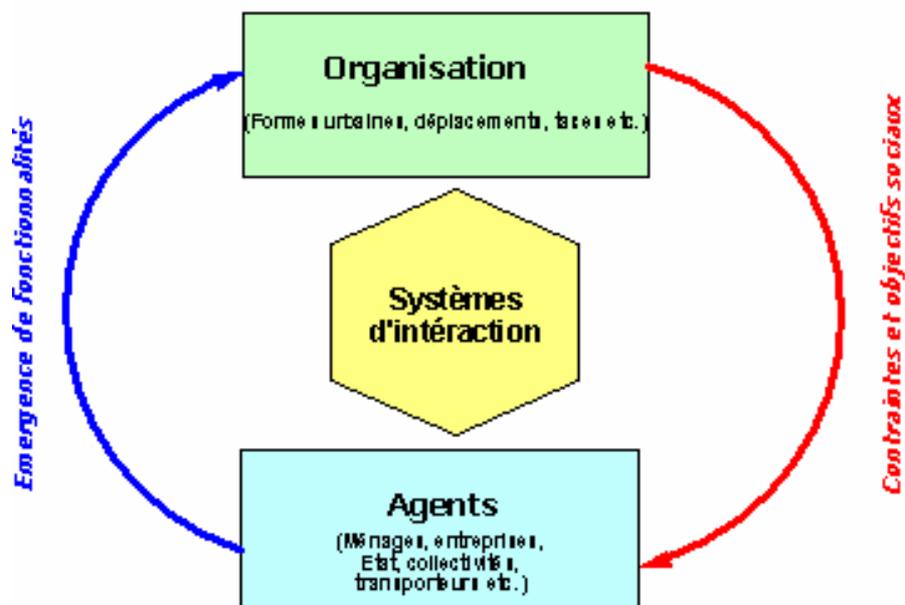


Figure 2. Interactions entre le niveau microscopique (comportement des agents) et le niveau macroscopique (comportement du système).

L'approche SMA présente donc un autre mode de penser la réalité d'un point de vue systémique : faire émerger un comportement significatif, au sein d'une structure, dont chaque élément pris isolément est complètement dépourvu. En modélisation SMA, il convient de décrire le comportement individuel des agents et leurs interactions. L'approche SMA met en avant le comportement individuel puis la cohérence des deux niveaux de « compréhension » du système : la simulation des comportements individuels doit naturellement déboucher sur la mesure des indicateurs censés décrire la dynamique du système.

2.3. OBJECTIFS OPERATIONNELS DU PROJET MOBISIM SMA

Le travail effectué dans le cadre du projet MobiSim se place dans le cadre des exercices de prospective. **MobiSim SMA est une plateforme de simulation pour l'étude prospective de la mobilité urbaine des agglomérations françaises et européennes à l'horizon 2025.** Il ne s'agit pas de prédire la situation de 2025 mais de projeter sur 20 ans les comportements actuels pour percevoir les tendances et anticiper les politiques de transport et d'aménagement du territoire.

La plateforme MobiSim SMA est développée dans la perspective d'être à la fois :

- **générique** et applicable aux Agglomérations urbaines françaises et européennes : outil de réflexion théorique sur l'évolution des formes urbaines (étalement urbain, hiérarchie d'échelle, forme fractale), l'impact des politiques de transport et d'urbanisme sur la mobilité urbaine, et l'interaction entre ces différentes politiques ;
- **appliquée** pour l'aide à la décision et le débat public dans des situations concrètes, de tests des scénarios d'aménagement du territoire et de discussion sur des hypothèses de modélisation transparentes.

Nous déclinons donc dans les paragraphes suivants les différents objectifs théoriques et appliqués dans la perspective desquels nous avons construit le modèle MobiSim SMA.

2.3.1. Construire un modèle multi-agent intégrant système de transports et urbanisme

Le premier objectif des travaux de recherche et développement MobiSim SMA est de construire un modèle multi-agent intégré Transport – Urbanisme à partir du comportement des ménages et des entreprises. Le développement du modèle permet :

- de déterminer les variables clefs des scénarios de transport et d'urbanisme,
- de comprendre les interactions entre déplacements et occupation du sol,
- d'explorer les dynamiques possibles de la morphologie urbaine (morphologie fractale, étalement, fragmentation du centre, polarisation sociale des quartiers ...),
- de suivre l'évolution de la mobilité et ses impacts sociaux et environnementaux.

Pour évaluer les résultats de simulation, les indicateurs de mobilité suivants seront utilisés :

- Nombre de déplacements par zone, par motif et par mode ;
- Distance totale parcourue ;
- Durée des déplacements ;
- Coût des déplacements pour les individus et pour les collectivités, coût social ;
- Niveaux d'émissions et leurs impacts sur l'environnement.

En outre, nous développons également un tableau de bord « Mobilité urbaine et développement durable » composés d'indicateurs de performance économique, sociale et environnementale pour évaluer les différents scénarios de transport et d'urbanisme.

2.3.2. Produire une plateforme de simulations ergonomique

La plateforme MobiSim SMA doit être un outil d'aide à la décision permettant à des « non modélisateurs » de tester différents scénarios d'organisation et de planification urbaine en vue d'élaborer des documents de type SCoT, où chaque scénario doit être appréhendé de manière globale, et tenant compte des interactions permanentes entre urbanisme et système de transport.

Les spécificités de la plateforme MobiSim SMA feront l'objet d'un document ultérieur dans lequel nous préciserons l'interface d'utilisateur, les couplages entre MobiSim et les bases de données (en particulier l'utilisation de SIG), les sorties disponibles et les scénarios adaptables par l'utilisateur.

2.3.3. Tester des scénarios établis pour le SCoT

Dans un objectif d'application directe, la plateforme MobiSim SMA doit être un outil de débat public permettant d'évaluer différents scénarios alternatifs au regard des critères du développement durable.

MobiSim SMA devrait permettre d'apporter des éléments de réponses à des questions du type de celles posées par les urbanistes lors de la réunion du 29 mars 2004 à l'AUDIAR :

- L'emploi va-t-il se déconcentrer ?
- Faut-il ou non favoriser les polarités nouvelles, relativement à leur impact en terme de déplacements ?
- Quelles perspectives pour les déplacements périphérie – périphérie ? Et quelles alternatives à la voiture ?
- Faut-il densifier la première couronne ?
- Quelles sont les conséquences possibles d'un scénario de développement du logement plus concentré le long des axes ferrés en deuxième couronne ?

LE MODELE MOBISIM SMA

Nous débutons ici la description du fonctionnement du modèle MobiSim SMA : son architecture global, les algorithmes qui régissent le fonctionnement de chacun des agents pris en compte, et les hypothèses de modélisation retenues au niveau global et agent par agent.

La partie 3 caractérise le système et le cadre d'étude et présente l'architecture globale de la plateforme et du modèle MobiSim SMA.

Les parties numérotées de 4 à 11 décrivent successivement les algorithmes qui régissent le comportement de chaque agent pris en compte dans le modèle :

- Les **Agents Espace** et l'action des **Agents Globaux** sur la dynamique de l'occupation du sol (partie 4) ;
- Les **Agents Ménages** (Démographie et choix de localisation / partie 5 ; Déplacements de personnes / partie 10) ;
- Les **Agents Entreprises** (Cycle de vie et stratégie de localisation / partie 6 ; Transport de marchandises / partie 10) ;
- Les **Agents Statiques** (Réseaux VP et TC / partie 9).

Les parties 7 et 8 détaillent respectivement l'organisation du marché de l'emploi et du marché immobilier. La partie 11 décrit les indicateurs que nous utilisons pour apprécier les politiques de transport au regard des critères du développement durable.

3. ARCHITECTURE DU MODELE MOBISIM SMA

Nous commençons par présenter les contours du système d'étude, le cadre spatio-temporel de l'analyse et les hypothèses générales de l'exercice de projection, avant d'entrer dans le cœur du modèle en présentant les différents agents modélisés. Les parties suivantes présenteront de manière détaillée chaque groupe d'agents en interaction dans le système, les règles de comportement des agents et les processus d'interaction.

3.1. SYSTEME D'ETUDE

3.1.1. Caractérisation spatiale

Le système étudié est circonscrit aux limites de l'aire urbaine. Il s'agit d'un système ouvert dont les échanges avec le « monde extérieur » sont pris en compte par l'intermédiaire de scénarios macroscopiques. L'environnement macro-économique est également considéré comme scénario exogène. Le modèle traite de la localisation des activités et des ménages sur le territoire de l'aire urbaine, ainsi que de la mobilité engendrée par ces activités et ces ménages dans l'aire urbaine considérée.

Le système « aire urbaine » est subdivisé en zones. Nous reviendrons sur ce découpage de premier niveau dans la description des agents Espace (partie 4). Une zone correspond à une entité géographique pour laquelle on possède des données statistiques cohérentes avec le degré de finesse de description du modèle. Dans le cadre d'application à des agglomérations françaises, la zone sera équivalente à une zone IRIS ou à un regroupement de zone IRIS. Pour faciliter l'interprétation des simulations et des tests de scénarios, il pourra être intéressant de faire coïncider le découpage en zones statistiques avec le

découpage administratif au niveau duquel les décisions politiques peuvent être prises. C'est au niveau zonal que le modèle MobiSim SMA traite l'évolution des variables d'état.

Un maillage physique de l'aire urbaine complète la description spatiale du territoire. Ce maillage définit typiquement des mailles de 25 ha (maille carrée de 500 m de côté). Le maillage est utilisé d'une part pour simuler la dynamique de l'occupation du sol, d'autre part pour estimer les impacts sociaux et environnementaux de la mobilité. Les variables dont l'état est simulé au niveau des zones peuvent être désagrégées au niveau des cellules en fonction du type d'occupation du sol. Les agents dynamiques (Ménages et Entreprises) restent localisés au niveau de la zone mais la désagrégation au niveau des mailles donne une estimation quantitative de l'occupation de chaque cellule. Nous reviendrons également ultérieurement sur le fonctionnement de ce découpage de deuxième niveau ainsi que sur l'articulation des deux découpages proposés.

3.1.2. Echelle et résolution temporelles

Le projet se donne pour horizon de simulation l'année 2025 (prospective à 20 ans). MobiSim SMA a l'ambition d'intégrer les différentes dynamiques qui structurent l'espace urbain et modifient la mobilité urbaine. Ces différentes dynamiques (mobilité quotidienne, dynamique d'emploi, dynamique d'activité, localisation résidentielle, infrastructures de transport, aménagement du territoire) ont des temps caractéristiques qui s'échelonnent du jour à la décennie (voire au-delà du siècle en ce qui concerne l'héritage historique et patrimonial des centres villes).

Le pas de fonctionnement du modèle est le pas de temps annuel. C'est à ce rythme que sont pris en compte les événements démographiques, les choix de localisation, les modifications du contexte macro-économique ...

Le déplacement des personnes et le transport de marchandises en ville sont simulés sur un nombre de jours donnés chaque année. On peut choisir typiquement de simuler une semaine complète (programme hebdomadaire type) par an.

MobiSim SMA n'a pas vocation à être un modèle de trafic. Si nous quantifions grossièrement les problèmes de congestion (qu'il semble pertinent de prendre en compte pour les questions de bouclage par rapport aux choix de localisation), nous ne descendons pas en dessous d'un pas de temps journalier. Nous décrivons l'heure de pointe d'un point de vue théorique comme étant la plage de temps (dont la durée peut évoluer au cours de la simulation) pendant laquelle la majorité des déplacements a lieu (mouvements pendulaires du début de journée par exemple). Nous reviendrons sur ces questions de temps simulés dans la description des différents processus pris en compte, en particulier au sujet de la mobilité urbaine et des problèmes de congestion.

3.1.3. Finesse de description

Le modèle MobiSim SMA a pour objet de simuler les dynamiques urbaines (morphologie de la ville et mobilité quotidienne) à partir des comportements des acteurs de la mobilité : Ménages, Entreprises, Agents globaux. Le modèle est basé sur la description du comportement démographique et de mobilité des ménages. Les ménages sont individualisés et leurs caractéristiques individuelles déterminent leurs choix (choix résidentiel, choix professionnel, programme d'activité, choix modal). Côté entreprises, l'objectif est de simuler la dynamique des emplois au sein de l'aire urbaine et les dynamiques de localisation des différents secteurs d'activité à partir des stratégies propres à chaque secteur d'activité et typologie d'entreprise. La suite du présent document détaille pour chaque agent les algorithmes qui gèrent ses propres dynamiques (déplacements quotidiens, localisation) et dont émergent les dynamiques globales de l'aire urbaine (dynamique de la mobilité et évolution de la morphologie urbaine).

3.2. STRUCTURE GLOBALE DE LA PLATEFORME ET DU MODELE MOBISIM SMA

Le projet MobiSim SMA a pour ambition de réaliser une plateforme de simulation qui puisse être utilisées par des non-modélisateurs pour tester différents scénarios du type SCoT et pouvoir comparer les différentes politiques territoriales de transport et d'urbanisme au regard de critères de développement durable.

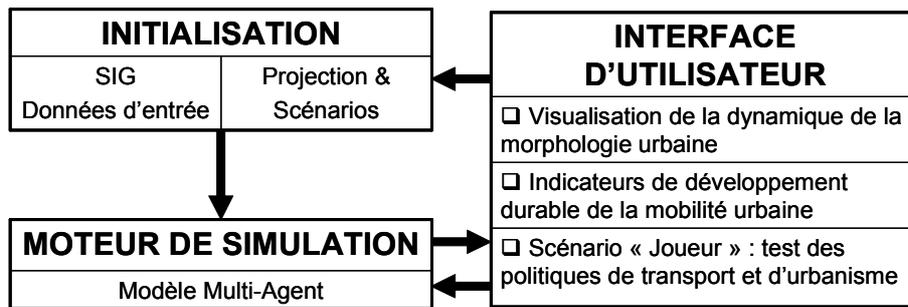


Figure 3. Architecture de la plateforme MobiSim SMA.

La plateforme MobiSim SMA (Figure 3) comprendra donc, outre le modèle multi-agent proprement dit, une interface d'utilisateur et un module d'initialisation. Le module d'initialisation prévoit le recueil des données nécessaires à l'initialisation des simulations à partir de bases de données, en particulier de bases de données géoréférencées en provenance de systèmes d'informations géographiques (SIG) ; il inclut également le traitement des scénarios de projection et des scénarios de politique d'aménagement du territoire et de transports urbains définis par l'utilisateur. L'interface d'utilisateur rendra plus aisée la communication entre le modèle et l'utilisateur ; elle permettra de visualiser la dynamique de la morphologie urbaine, de suivre pour chaque scénario les indicateurs de développement durable de la mobilité urbaine et de modifier les scénarios politiques à partir de mesures types prédéfinies.

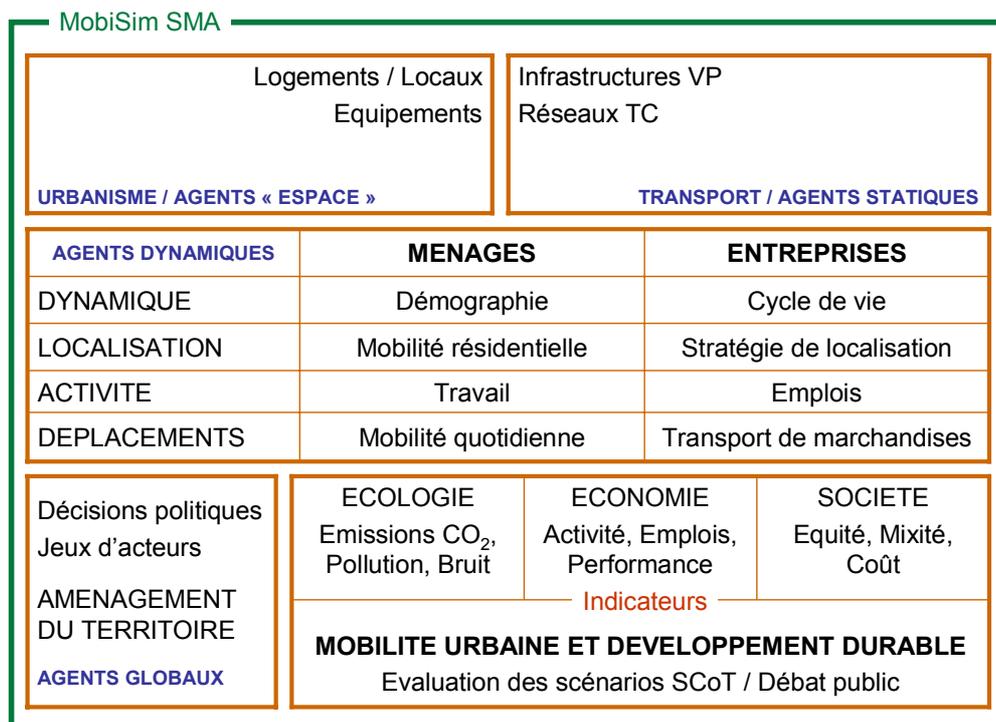


Figure 4. Les différentes composantes du modèle MobiSim SMA.

La Figure 4 présente synthétiquement les différentes composantes du Modèle MobiSim SMA : les différents types d'agents modélisés et le tableau de bord « Mobilité urbaine et développement durable » qui regroupe des indicateurs économiques, sociaux et environnementaux de la mobilité urbaine.

Le modèle proprement dit constitue le cœur de simulation. Il simule quatre types d'agents en interaction :

- **Les Agents Espace** sont les briques de base qui construisent la morphologie urbaine et sur lesquelles se localisent et se déplacent les Agents Dynamiques.
- **Les Agents Dynamiques** (Ménages et Entreprises) se localisent sur l'aire urbaine et se déplacent afin de réaliser leur programme d'activités.
- **Les Agents Statiques** (Infrastructures VP et TC), positionnés sur le territoire, caractérisent l'offre de transport.
- **Les Agents Globaux** (qui prennent en compte les décideurs politiques, les transporteurs, les différents groupes de pression) peuvent modifier les Agents Espace et les Agents Statiques.

Les parties 4 à 11 décrivent successivement les algorithmes qui génèrent le comportement de chacun des agents ainsi que les interactions entre ces différents agents.

3.3. VUE D'ENSEMBLE SUR L'ALGORITHME DU MODELE

Initialisation

Lecture des données d'entrées

Individualisation des données agrégées

Lecture des paramètres de projection

Calcul des paramètres démographiques, économiques et financiers de l'année courante

Dynamique des agents dynamiques (pas de temps annuel)

Événements démographiques (ménages)

Occupation principale I (ménages)

Démographie d'entreprises (entreprises)

Localisation des agents dynamiques

Parc immobilier (zones)

Marché immobilier (ménages)

Localisation des activités économiques (entreprises)

Activités des agents dynamiques

Marché de l'emploi (zones)

Occupation principale II (ménages)

Déplacements (simulation d'une journée complète)

Déplacements de personnes (ménages)

Transport de marchandises (entreprises)

Congestion des tronçons (voirie et réseaux)

Mobilité urbaine (zones)

Impact environnemental (zones)

Impact social (zones)

Attractivité des zones (zones)

Ville et développement durable

Performance économique (aire urbaine)

Impact environnemental (aire urbaine)

Impact social (aire urbaine)

Scénarios SCoT, interface d'utilisateur

Modification des agents statiques (voirie et réseaux)

Modification des infrastructures (zones)

Incrémentation d'un an

Viellissement des individus

Détérioration des locaux et des logements

4. REPRESENTATION SPATIALE, AGENTS ESPACE ET MAILLES

Nous commençons la description des algorithmes des différents agents par la présentation des agents Espace et la question de la représentation du territoire de l'aire urbaine dans le modèle MobiSim SMA.

4.1. LES 3 NIVEAUX DE REPRESENTATION DE L'ESPACE GEOGRAPHIQUE

L'espace géographique est représenté à trois niveaux différents :

- un **niveau global** (l'aire urbaine) qui englobe tout le système ;
- un **niveau zonal** (zones statistiques et administratives) qui permette de prendre en compte les localisations des agents dynamiques sur le territoire (Ménages et Entreprises) ;
- un **maillage fin** (mailles ou cellules) pour simuler la dynamique de l'occupation du sol et calculer l'exposition des ménages aux impacts sociaux et environnementaux de la mobilité.

La Figure 5 représente schématiquement les trois niveaux de représentation spatiale. Les flèches indiquent les flux d'informations entre les différents niveaux que nous explicitons au cours des paragraphes suivants.

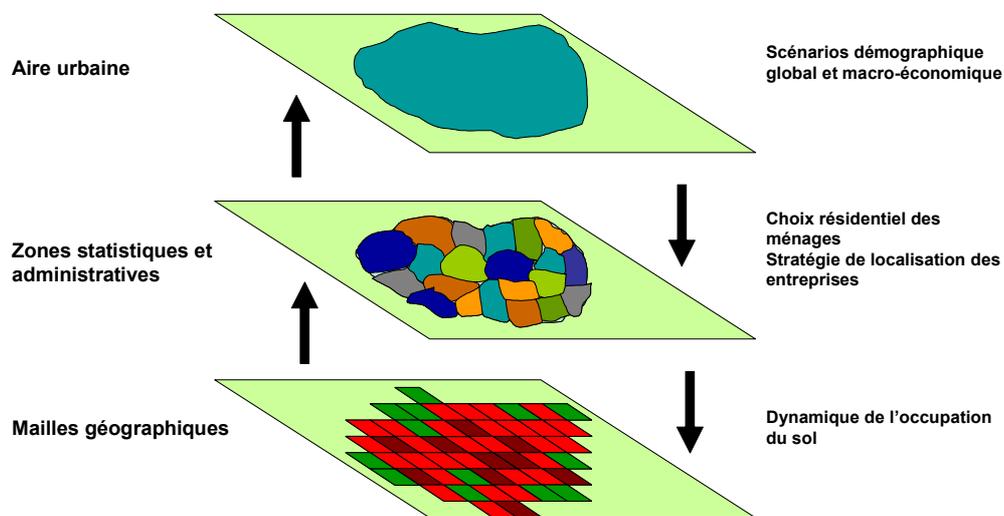


Figure 5. Représentation de l'espace géographique dans MobiSim SMA.

4.1.1. L'aire urbaine

C'est le niveau du système d'étude. Seront traités à ce niveau :

- En entrée, les scénarios démographiques et macro-économiques globaux ;
- En sortie, les indicateurs de performance globale de la mobilité urbaine.

Nous devons faire des hypothèses relativement fortes sur les échanges entre l'aire urbaine (système d'étude) et le monde extérieur :

- Impact sur la mobilité urbaine (interactions au quotidien entre les personnes qui habitent à

l'extérieure de l'aire urbaine et qui travaillent ou transitent par l'aire urbaine) ;

- Impact sur l'évolution de la population de l'aire urbaine (échanges migratoires qu'il faut prendre en compte dans les scénarios de simulation).

Nous procédons ensuite à un double découpage de l'aire urbaine : le découpage IRIS pour traiter les données et gérer l'évolution des Agents dynamiques (Ménages et Entreprises) et un maillage plus fin pour simuler la dynamique de l'occupation du sol, désagréger l'information (dans un objectif de représentation cartographique fine) et estimer notamment le coût social et environnemental de la mobilité (à partir des données désagrégées).

4.1.2. Les zones statistiques et administratives

La zone constitue le niveau central du modèle : c'est sur ce découpage que les variables d'état du modèle évoluent. C'est le niveau de localisation des Ménages et des Entreprises, et c'est également à ce niveau que s'effectuent les déplacements quotidiens (intrazones ou interzones). La zone correspond à une entité géographique pour laquelle on possède des données statistiques cohérentes avec le degré de finesse de description du modèle. Dans le cadre d'application à des agglomérations françaises, la zone est équivalente à une zone IRIS ou à un regroupement de zone IRIS. Pour faciliter l'interprétation des simulations et des tests de scénarios, il peut être intéressant de faire coïncider le découpage en zones statistiques avec le découpage administratif au niveau duquel les décisions politiques peuvent être prises.

La taille des zones est choisie en fonction de la capacité technique des simulations. Le nombre d'agents réellement simulés pouvant être réduit par duplication à condition que la taille des zones soit statistiquement cohérente avec le coefficient de duplication (on peut prendre par exemple un ménage réellement simulé pour représenter 10 ménages). La taille des zones doit ainsi être suffisamment importante pour garantir la pertinence statistique mais pas trop large afin de garder la représentation de l'hétérogénéité du territoire urbain.

Les ménages et les entreprises analysent leur choix de localisation en fonction des caractéristiques des zones et de leurs préférences. Nous détaillons dans le paragraphe 4.2 les caractéristiques des zones qui peuvent être prises en compte et la manière de les prendre en compte. Nous détaillerons les préférences des ménages et des entreprises lorsque nous présenterons le fonctionnement détaillé du marché immobilier (partie 8).

4.1.3. Les mailles géographiques

La maille correspond à un découpage géographique fin du territoire. Les informations concernant les ménages et les entreprises d'une zone sont désagrégées au niveau des mailles mais cette désagrégation reste « anonyme » : l'objectif n'étant pas à ce niveau de connaître les localisations des ménages individuels mais de pouvoir quantifier le nombre de ménages par maille afin, entre autres, d'évaluer le nombre de ménages exposés directement à la pollution automobile. L'objectif de l'introduction d'un maillage fin est triple :

- Simuler la dynamique de l'occupation du sol, dans le but notamment de tester l'impact des différents scénarios sur le processus d'étalement urbain ;
- Estimer l'offre de logements au niveau de la zone en fonction de l'occupation du sol définie dans chaque maille ;
- Estimer les impacts sociaux et environnementaux de la mobilité urbaine.

Le maillage est constitué d'un réseau régulier de cellules carrées de 500 (ou 250) m de côté. Le maillage

peut dépasser de l'aire urbaine définie au départ de la simulation afin de pouvoir prendre en compte un éventuel étalement de l'aire urbaine au-delà de l'aire fixée initialement (mais ceci suppose de prendre en compte les communes à la frange de l'aire urbaine au début de la simulation – en particulier leur état initial).

Dans un premier temps, on simulera la dynamique d'occupation du sol de façon binaire (bâti / non bâti). On ajoutera éventuellement une estimation de la densité de la maille en fonction de sa localisation dans l'aire urbaine et de son accessibilité. L'algorithme qui régit la dynamique de l'occupation du sol sera décrit dans le paragraphe 4.3. Il sera possible de préciser par la suite le modèle d'occupation du sol en s'intéressant à différents types de mailles (caractères résidentiel, industriel, commercial, et vert) et aux interactions entre elles.⁴

Zone et Mailles sont liées par des flux d'informations :

- Désagrégation des données zonales au niveau des mailles en fonction de l'occupation du sol définie dans chaque maille ;
- Agrégation de l'offre immobilière des mailles pour quantifier l'offre zonale ;
- Estimation du nombre de ménages exposés dans chaque maille pour évaluer l'exposition des ménages aux émissions des transports, par zone et pour l'aire urbaine totale.

Pour quantifier l'impact social et environnemental de la mobilité, nous qualifions les mailles en fonction des flux de circulation qui les traversent.

4.2. LES CARACTERISTIQUES DES ZONES

Les Agents Espace Zones seront caractérisés par leur parc immobilier, les aménités urbaines et rurales qu'elles offrent, et leur accessibilité. Ces caractéristiques détermineront l'attractivité des différentes zones au regard des agents dynamiques (Ménages et Entreprises) en fonction de leur typologie propre. Les critères de choix seront évalués de façon objective mais les degrés de préférence accordés à ces différents critères seront fonction des caractéristiques des agents dynamiques. Un ménage avec enfants accordera par exemple un poids plus important aux équipements scolaires dans un voisinage immédiat. Une industrie lourde préférera une proximité transport, tandis qu'un petit commerce cherchera une aire de chalandise optimale.

Nous définissons d'abord la manière dont nous prenons en compte le parc immobilier. Nous décrirons ensuite les possibilités de prise en compte dynamique de l'offre zonale d'aménités urbaines et rurales puis la manière de calculer l'accessibilité.

4.2.1. Parc immobilier

Nous avons choisi une représentation mésoscopique du parc immobilier : logements et locaux d'entreprises sont modélisés globalement dans chaque zone par type et taille. Nous adaptons ici les développements présentés dans les études MobiSim antérieures (représentation de dynamique des

⁴ Nous avons d'ailleurs pris contact avec Guy ENGUELEN (RIKS, Maastricht) dans le but d'implémenter éventuellement une dynamique de l'occupation du territoire plus complexe basée sur un automate cellulaire dont les transitions sont des fonctions de voisinage.

systemes). La Figure 6 présente les relations entre les différentes variables qui jouent sur l'évolution du parc de logement. Nous modélisons de façon similaire l'évolution du parc immobilier d'entreprises.

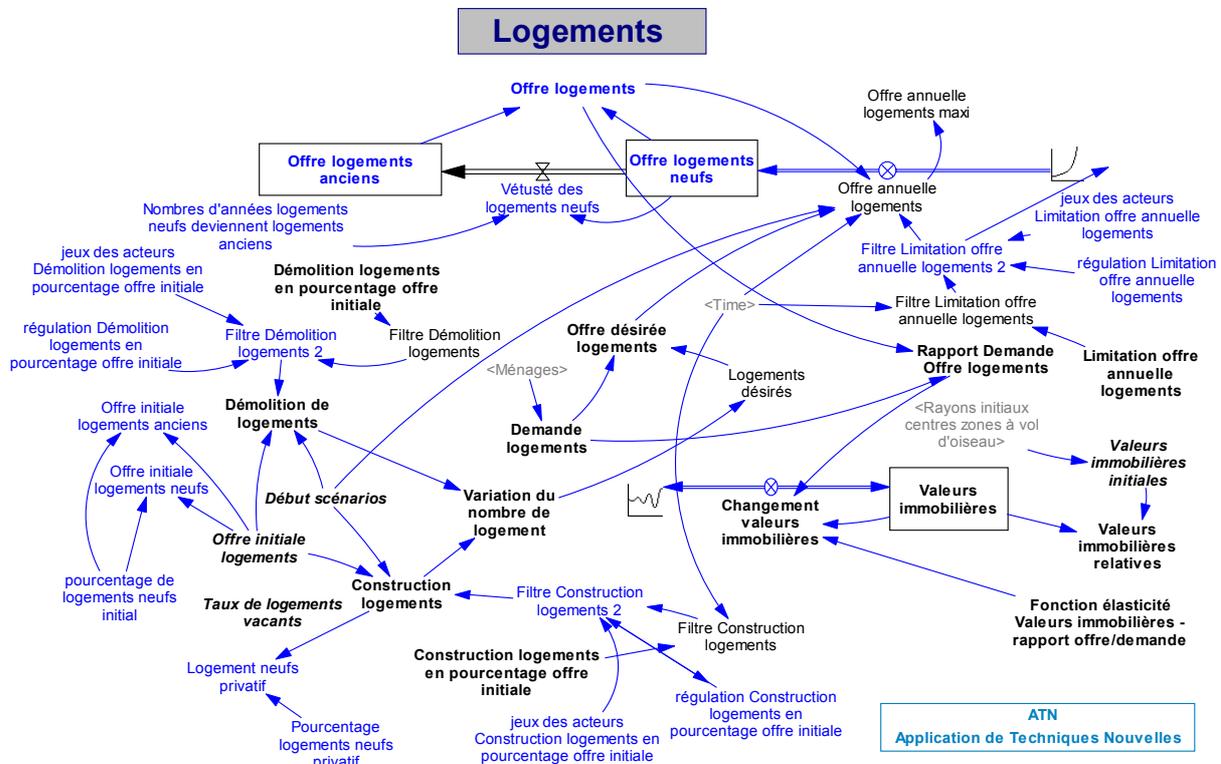


Figure 6. Modélisation de la dynamique de l'offre de logements.

a. Mécanismes

i. CONSTRUCTION

La dynamique d'occupation du sol (cf. 4.3) définit les nouveaux terrains à bâtir. La construction peut être gérée à différents niveaux :

- scénarios du type SCoT (pour les projets déjà planifiés),
- conséquence de l'accession à la propriété des particuliers (dans les zones définies à bâtir),
- décisions de l'utilisateur (scénario joueur).

ii. DEMOLITION

La démolition peut être implémentée dans les scénarios d'aménagement du territoire et dans les scénarios joueurs (démolition de logements vacants). En outre, logements et bureaux se dégradent progressivement avec le temps (durée depuis la construction ou la dernière rénovation). Les logements ou bureaux vides sont rénovés si la rénovation permet d'augmenter les prix de location d'un montant annuel supérieur au coût de la rénovation. La rénovation conduit à l'immobilisation des logements vacants pendant la durée des travaux. On gère la transformation de logements en bureaux ou réciproquement à partir du moment où le gain du point de vue de la location annuelle dépasse le coût de la conversion.

iii. PRIX ET AJUSTEMENT DES PRIX

On simule le prix moyen par m2 pour les différentes zones et la variation au prix moyen en fonction des caractéristiques du logement (qualité, type). Le prix moyen par zone est défini en fonction des

caractéristiques de la zone (accessibilité de la zone et environnement). On peut se baser sur le simulateur de prix de l'Agence Départementale d'Information sur le Logement d'Ille-et-Vilaine (ADIL 35).

On ajuste en cours de simulation les prix des loyers relatifs à chacune des zones en fonction du ratio Demande / Offre : $P(t + 1) = [1 + \varepsilon(D/O)] * P(t)$ avec $\varepsilon(x)$ fonction d'élasticité des prix, croissante bornée de $[0 ; 2]$ dans $[-0.05 ; +0.05]$.

b. Parc de logements

Nous distinguons les logements en fonction de :

- leur taille : 5 classes de taille (F1 à F5) ;
- leur environnement direct : logement individuel / logement collectif.

Le type d'occupation (propriété / locataire privé / logement social) est pris en compte comme une caractéristique du ménage (à moins qu'on décide de distinguer le parc social au stade des équipements par zone).

Nous avons donc $5 * 2 = 10$ types de logements, qui pourront être vides ou occupés. Le modèle comptabilise le nombre de logements vides et occupés de chaque type.

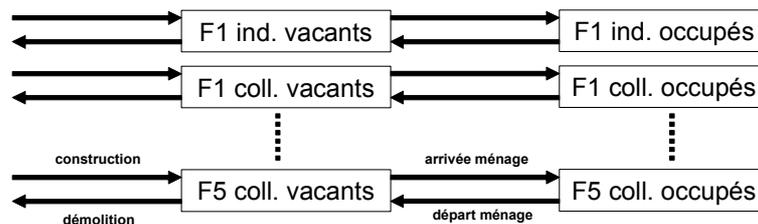


Figure 7. Représentation du parc de logements.

c. Locaux d'entreprises

Pour les locaux d'entreprises, nous distinguons les surfaces commerciales, les bureaux et les surfaces dédiées aux établissements particuliers (usines, entrepôts, hypermarchés, supermarchés ...).

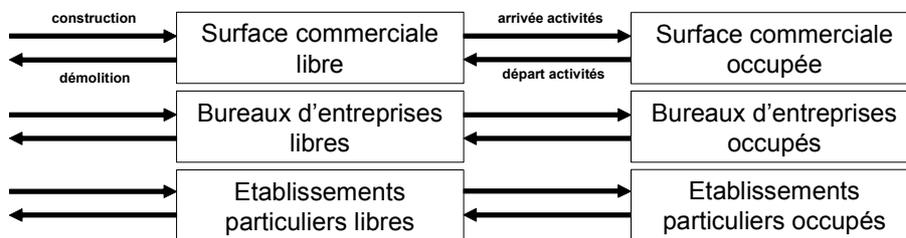


Figure 8. Représentation du parc de locaux d'entreprises.

4.2.2. Aménités urbaines

L'interface SIG / MobiSim SMA doit permettre de localiser sur les mailles (et les zones) les différents équipements disponibles : pôles de quartier (commerces de proximité), équipements scolaires (Ecoles, Collèges, Lycées, Universités), équipements culturels et sportifs (gymnases, piscines, cinémas, restaurants ...), équipements publics (équipements hospitaliers, services publics).

La présence d'équipements sur une zone permet d'apprécier l'attractivité de la zone en question et permet d'évaluer l'utilisation de ces zones pour les différents motifs (études, loisirs).

Deux choix possibles :

- apprécier les aménités urbaines une par une ;
- supposer qu'il y a des corrélations fortes entre les aménités urbaines et définir quatre ou cinq classes de zones à partir d'un indicateur qui agrège les disponibilités des différentes aménités.

Si on choisit de coter globalement les caractères urbain et rural des zones, on peut attribuer un certain nombre de points à la présence d'équipements ou de service et utiliser cet indicateur pour classer les zones en fonction de leurs caractères urbain et rural.

Administration et services : Mairie, Poste, Gendarmerie, Police, Caserne de pompiers, Préfecture

Equipements sanitaires : Médecins, Cliniques, Hôpitaux

Equipements scolaires et universitaires : Ecoles maternelles et primaires, Collèges, Lycées, Universités, Grandes écoles

Commerces : Petits commerces, Supermarchés, Centres commerciaux, Grands magasins spécialisés, Hypermarchés

Equipements culturels : Cinémas, Théâtres, Salles de spectacle

Lieux de rencontres : Bars, Cafés, Restaurants

Equipements sportifs : Gymnases, Stades, Piscines, Patinoires, Centres équestres ...

4.2.3. Les Aménités Rurales

Occupation du sol : Superficie non bâtie / Superficie totale

Espaces verts : Champs, Parcs, Forêts, Lacs, Rivières

Qualité paysagère : Paysage ouvert, Biodiversité ...

4.2.4. Typologie de zone

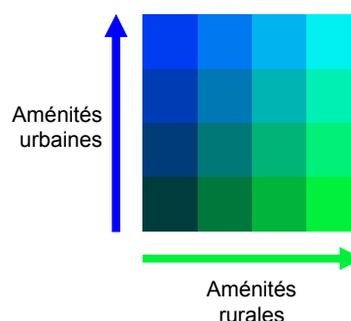


Figure 9. Classification des zones en fonction de la disponibilité d'aménités urbaines et rurales sur leur territoire.

A partir des indicateurs d'urbanité et de ruralité de la zone, on peut définir le type de la zone sur deux axes, celui des aménités urbaines sur lequel on reporte la valeur de l'indicateur d'urbanité, et celui des aménités rurales, sur lequel on reporte la valeur de l'indicateur de ruralité. Ce procédé définit 16 types de zones (pour un découpage de chacun des indicateurs en 4 classes) ; parmi ces 16 types, seul un nombre limité sera représenté dans l'aire urbaine (une zone ne sera probablement pas à la fois très urbaine et très rurale par exemple) ce qui réduira le nombre de typologie réelle (éventuellement réductible à la

diagonale ($x + y = 1$) donc à 4 types de zone : ville centre, ville de banlieue proche, ville de banlieue résidentielle, ville périurbaine).

Pour chaque indicateur (ruralité / urbanité), on peut classer les zones en 4 classes :

- R1 (très rural) à R4 (très peu rural),
- V1 (très urbain) à V4 (très peu urbain).

Nous pouvons ainsi hiérarchiser les zones en fonction de leur ruralité ou leur urbanité.

Idées pour l'initialisation, le calage et la validation

Faire la cartographie de l'aire urbaine de Rennes afin de vérifier que les critères définis sont pertinents et suffisant pour hiérarchiser les zones de façon significative. On pourra alors revoir les méthodes de cotation des zones et les coefficients de pondérations.

Si le découpage retenu met en évidence des zones plus larges homogène dans leur typologie, on pourra éventuellement envisager un regroupement des zones (s'il est nécessaire du point de vue technique de procéder à une réduction du nombre d'agents réellement simulés).

4.2.5. Mesure de l'accessibilité

La mesure de l'accessibilité répond au principe de satisfaction des besoins des ménages ou des activités économiques. Nous développons en 4.3.2 (Figure 15) la mesure de l'accessibilité d'une zone pour les ménages.

Nous quantifions l'accessibilité aux aménités urbaines et aux aménités rurales. Cette quantification de l'accessibilité aux aménités peut se faire critère par critère ou bien directement à partir des indicateurs agrégés (respectivement d'urbanité et de ruralité).

4.2.6. L'attractivité de la zone⁵

L'attractivité de la zone est calculée au regard de l'agent dynamique qui doit décider de sa localisation : le ménage qui cherche un nouveau logement ou l'entreprise qui cherche de nouveaux locaux. Nous présentons ci-dessous le calcul de l'attractivité de la zone par rapport à un ménage qui cherche un logement. La démarche sera identique pour estimer l'attractivité de la zone pour une entreprise qui recherche des locaux. Les qualités de la zone que nous prendrons en compte sont : l'accessibilité aux aménités urbaines, l'accessibilité aux zones vertes, la qualité environnementale, la qualité de vie, le temps de déplacement intrazone, les distances interzones. Les préférences des agents dynamiques dépendent des caractéristiques individuelles de ces agents.

Formalisation simplifiée du choix résidentiel :

Sont en principe à distinguer **la phase d'évaluation** des critères pour les différentes zones considérées par l'agent comme potentiellement intéressantes, et **la phase de décision** (choix). Le choix se fera en fonction d'une **optimisation multicritère**. Cette question a été traitée dans différents travaux réalisés à **ThéMA** sous la direction de Pierre FRANKHAUSER en recourant à une formalisation basée sur la théorie des sous-ensembles floue. La formalisation proposée pour l'évaluation se réfère à des

⁵ Cette partie et la suivante sont des contributions de Pierre FRANKHAUSER.

informations recueillies par des enquêtes⁶. Pour chaque critère i est considéré dans ce concept de formalisation :

- ***l'évaluation par l'agent*** : il jugera une situation donnée selon ses références propres. L'enquête sert à identifier différents types d'agents m en fonction de leur évaluation. Cette connaissance sert à estimer pour une zone résidentielle donnée, dont les caractéristiques sont connues, de quelle manière elle serait évaluée par un agent appartenant au type de ménage m .
- ***l'importance qu'il affecte au critère i*** : même si des agents partagent le même avis par rapport à un critère, ils y affectent éventuellement une importance différente (par exemple le prix foncier peut représenter un élément plus ou moins important dans l'évaluation).

La combinaison de ces deux éléments est synthétisée à travers une « ***attractivité partielle*** ». Un opérateur flou sert à formaliser l'arbitrage entre les différents critères et fournit une valeur synthétique sur l'attractivité du quartier.

Pour le modèle MobiSim, Pierre FRANKHAUSER propose une ***formalisation simplifiée*** en décidant dès le départ selon une « logique expert » de l'évaluation des critères. Les différents critères sont alors évalués de façon identique par tous les agents, le type d'agent (ménage) entrerait seulement en jeu pour les importances (préférences). Exemple : lotissement pavillonnaire / prix foncier abordable, école primaire à proximité. Les modalités observées pour ces critères sont « objectivement » positives, mais un étudiant y affecterait peu d'importance.

Connaissant la façon dont un agent juge des différents critères, il est possible de déterminer pour une zone j dont on connaît les caractéristiques, l'évaluation qu'un agent potentiel porte sur cette zone. Ainsi on affectera une valeur (modalité) c_i^j au critère i dans la zone j qui transcrit la qualité de i en j . En cohérence avec la formalisation floue, il est proposé de normaliser ce paramètre de façon suivante :

$$c_i^j = 0 \text{ pour qualité inacceptable ;}$$
$$c_i^j = 1 \text{ pour qualité acceptable ;}$$

toute valeur intermédiaire étant possible et caractérisant une évaluation nuancée de la part de l'agent (pour le détails cf. les publications citées). En cas d'information insuffisante, il est proposé de revenir à une logique binaire en se limitant aux valeurs extrêmes $c_i = 0$ et $c_i^j = 1$.

Pour chaque critère i sera alors à choisir une importance β_i^k . Ce paramètre ne dépend pas de la zone, mais traduit le profil de l'agent. Il est proposé de choisir selon une « logique expert » les valeurs de ce paramètre en fonction des types de ménages k considérés (à chaque type de ménage k on associe une valeur β_i^k pour le critères i). Pour chaque critère i les deux paramètres c_i^j et β_i^k sont à associer afin d'obtenir « ***l'attractivité partielle*** » de la zone j pour un agent (ménage) du type k . Ces attractivités partielles sont ensuite à combiner pour obtenir ***une valeur synthétique d'attractivité*** a^{jk} de la zone j pour l'agent (ménage) type k . Il existe évidemment une multitude de possibilités de combiner ces paramètres. Lors de la réunion à paris, deux possibilités ont été discutées :

- (1) Pierre FRANKHAUSER a d'abord proposée une logique multiplicative ;
- (2) ATN a évoqué la possibilité d'une logique linéaire ;

La formalisation linéaire devrait alors s'écrire supposant que nous considérons $i = 1, 2, \dots, I$ critères

$$a^{jk} = \sum_{i=1}^I \beta_i^k c_i^j$$

⁶ Frankhauser et al. (1998), Billot et al. (2000), Tannier & Frankhauser (2001), Pezzoli & Frankhauser (2001).

avec $\sum_i \beta_i^k = 1$ pour chaque k afin de garantir $0 \leq a^{jk} \leq 1$. Les termes $\beta_i^k c_i^j$ représentent alors les **attractivités partielles**. Une telle formalisation correspond par ailleurs à celle utilisée dans le cadre des **analyses multicritères**. Il faut être conscient qu'une telle forme suppose une possibilité de compensation (substitution) parfaite entre critères (un critère pour lequel $c_i = 0$, n'entraîne pas une évaluation $a_{jk} = 0$ de la zone, mais peut être parfaitement compensée par un autre). Il s'agit donc d'une évaluation plutôt « optimiste » ou « peu exigeante ».

La formalisation proposée par Pierre FRANKHAUSER s'appuie sur une logique d'exigence simultanée pour les différents critères. Elle est plutôt « pessimiste ». Elle pourrait être formalisée selon une des deux méthodes suivantes :

1. $a^{jk} = \prod_{i=1}^I (c_i^j)^{\beta_i^k}$
2. $a^{jk} = \left(\prod_{i=1}^I (c_i^j)^{\beta_i^k} \right)^{1/I}$

Les deux opérateurs, connus dans la théorie des sous-ensembles flous, jugent une zone « inacceptable » si un des critères est évalué par une valeur $c_i^j = 0$. La fourchette, dans laquelle se situe alors l'importance est

$$0 < \beta_i^k < +\infty$$

Une valeur $1 < \beta_i^k < +\infty$ correspond à une évaluation plus pessimiste et $0 < \beta_i^k < 1$ à une évaluation plus optimiste ; les attractivités partielles sont alors $(c_i^j)^{\beta_i^k}$.

Quel que soit le principe d'agrégation utilisé, les partenaires pensent qu'il paraît raisonnable de considérer dans cette version simplifiée que l'agent choisira la zone la plus attractive (classement des attractivités partielles).

4.3. LA DYNAMIQUE DE L'OCCUPATION DU SOL

4.3.1. Les dynamiques lentes

La transformation des configurations spatiales dans les zones urbaines et périurbaines est essentiellement conditionnée par les décisions agissant sur l'agent « espace ». Deux types d'acteurs sont en mesure d'influencer cette dynamique à travers leurs décisions :

- (1) **Les ménages** à la recherche de logements ou de maisons ou **les entreprises** cherchant à s'installer à un endroit. Dans le modèle MobiSim ces acteurs sont les **agents dynamiques** qui correspondent aux ménages et aux entreprises. Ce volet définit la **demande** foncière (d).
- (2) Les acteurs qui fournissent (ou non) la possibilité de satisfaire la demande. Plusieurs types d'acteurs doivent être distingués : les **acteurs publics** (collectivités) qui décident de la mise en place des zones constructibles et ainsi de l'offre potentielle de terrain. En réalité s'ajoutent les **constructeurs de lotissements (CL)** qui répondent à la demande émanant du choix résidentiel et les **propriétaires fonciers (PF)** qui souhaitent vendre leurs terrains dans les meilleures conditions. Ce dernier phénomène est aussi une conséquence du déclin de l'agriculture dans ces zones. L'ensemble de ces actions définit l'**offre** foncière. Dans le modèle MobiSim les acteurs publics doivent être associés aux **agents globaux**. Les autres acteurs ne sont pas pris en compte explicitement dans le modèle.

Nous donnons quelques précisions sur la stratégie de ces acteurs :

- **Les ménages à la recherche d'un nouveau lieu résidentiel (MD)** : Les critères du choix de localisation sont intégrés dans le cahier des charges et ont été discutés dans plusieurs de mes contributions. Les critères de choix à prendre en compte ainsi que leur formalisation paraissent clairs.
- **Les ménages installés dans une zone résidentielle (villages périurbains) (MR)** : Il est évident que les nouveaux résidents ne veulent plus perdre les avantages perçus qu'ils ont acquis en s'installant dans le périurbain. Les caractéristiques de la vie dans le périurbain perçues comme avantages (vie calme, échelle de la commune qui correspond plutôt à celle d'un quartier urbain et dont la maîtrise du fonctionnement social paraît ainsi plus facile). Un agrandissement trop important d'une commune ou l'intention de densifier une zone résidentielle n'est donc pas bienvenue ; les résidents vont essayer d'empêcher une telle évolution (ce qui peut aller à l'encontre des politiques locales).⁷
- **Les acteurs publics locaux (villages périurbains)** : En ce qui concerne la stratégie de ces acteurs, deux tendances peuvent être distinguées :
 - **Stratégie de développement (AD)** : L'objectif de la politique locale est de consolider le fonctionnement de la commune (pérennisation des infrastructures, des écoles...). La périurbanisation est alors perçue comme possibilité de pallier la désertification rurale et le risque d'appauvrissement en équipements (bureau de poste, écoles, commerce de proximité ...).
 - **Stratégie de freinage (AF)** : Certains acteurs politiques locaux s'opposent après avoir admis une certaine périurbanisation à de futures constructions en faisant valoir le maintien du caractère rural de leur commune. Cette stratégie rappelle celle des résidents installés dans le périurbain qui souhaitent que leur commune ne dépasse pas une certaine taille. Or cet effet peut aussi contribuer à repousser la périurbanisation plus loin.

Le fonctionnement décrit pourrait être représenté sous forme d'un schéma systémique :

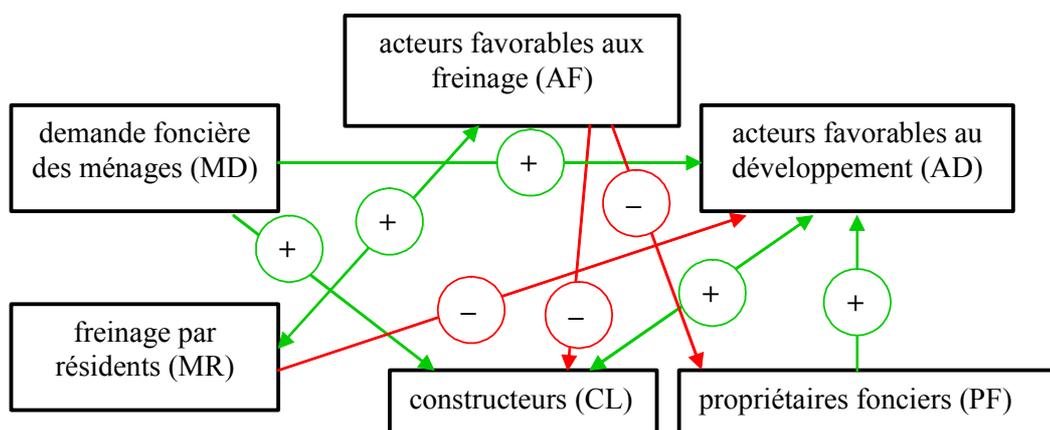


Figure 10. Schéma d'interactions entre acteurs locaux sur la dynamique d'occupation du sol.

Outre la stratégie d'optimisation multicritère des ménages (proximité des aménités « urbaines » et simultanément des aménités « rurales »), ces processus contribuent à l'émergence des tissus urbains à travers le contrôle de l'offre.

⁷ C'est l'effet que nous avons désigné comme la « dynamique du blocage » (Frankhauser, P. 1994), phénomène qui contribue également à l'étalement urbain.

4.3.2. Prise en compte dans MobiSim SMA

Pierre FRANKHAUSER a identifié plusieurs scénarios qu'il paraît utile à comparer par rapport à leur impact sur la mobilité quotidienne :

1. **La ville monocentrique dense** qui empêche tout étalement. Il s'agit d'une stratégie de contrôle locale très forte du processus d'urbanisation de la part de la ville-centre (« stratégie non-fractale » avec risque de s'approcher de la situation 4.)
2. **et 3. L'agglomération structurée de façon polycentrique / axiale / multi-échelle.** Il s'agit d'une stratégie de contrôle globale pour laquelle l'approche fractale est particulièrement adaptée.
4. **la ville étalée de façon uniforme** et non structurée. Phénomène d'étalement non contrôlé, stratégie de contrôle purement locale sans coordination.

Il paraît potentiellement possible d'intégrer ces scénarios à travers deux approches dont la nature est très différente :

1. l'utilisateur du logiciel conçoit de façon « manuelle » des scénarios qui correspondent aux quatre différentes logiques. Les dynamiques induites par les « acteurs globaux » sont ainsi considérées comme facteurs exogènes. Serait à introduire dans le modèle uniquement la réaction des constructeurs sur le marché foncier (offre par la politique publique et demande par les ménages).
2. on introduit pour les différents types d'acteurs des règles qui s'appuient sur les stratégies présentées et qui sont modifiées selon les différents scénarios. Il est ainsi possible de simuler l'émergence de la configuration spatiale, la dynamique lente devient donc un facteur endogène.

L'objectif de considérer des scénarios définis au préalable (**scénarios 1 à 4**) sert surtout à comparer l'impact de différents types de stratégies d'aménagement. Cette logique incite plutôt à recourir à l'approche 2. Prenons l'exemple des **scénarios 2/3** qui s'orientent vers l'intégration de l'approche fractale dans les stratégies d'aménagement. En utilisant l'approche 1, l'utilisateur devrait parfaitement connaître une méthodologie qui lui permet de développer des scénarios d'aménagement selon une logique fractale. Or une telle méthodologie n'est pas disponible à l'heure actuelle, son développement est essentiellement l'objectif du projet de recherche en cours d'élaboration entre le PREDIT et ThÉMA. En revanche dans l'approche 2, il est possible d'intégrer certaines règles dans le modèle qui correspondent aux différents scénarios. Le **scénario 2/3** sera modélisé en introduisant un principe d'emboîtement d'échelles à l'échelle de l'agglomération. La démarche sera heuristique et globale, elle ne s'appuiera pas sur les analyses spatiales détaillées de l'espace considéré telle qu'elles sont prévues dans le contrat PREDIT-ThÉMA.

Cependant certaines nuances sont à apporter à l'approche 2 :

- la déclaration de zones constructibles est un phénomène ponctuel ce qui facilite une approche de modélisation. Il existe en effet un certain nombre de modèles qui simulent une telle dynamique⁸. En revanche il paraît plus difficile de prévoir le choix d'un tracé d'une route ; une telle démarche nécessiterait un modèle particulier qui prend par exemple en compte un modèle numérique du terrain afin d'analyser un tracé optimisé. Dans le contexte donné une telle démarche paraît difficile. Il est donc proposé de ne modéliser que l'implantation de zones constructibles en fonction du réseau de transport donné qui reste un facteur exogène.

⁸ Notamment les modèles d'automates cellulaires (R.White, G. Engelen, M. Batty, P. Longley etc.)

- L'intégration de la dynamique des acteurs dans le modèle introduit la notion d'auto-organisation à une échelle agrégée, celle des **acteurs globaux**. Leurs stratégies peuvent être soumises à des contraintes fortes (législation, stratégie très volontariste à l'échelle de l'agglomération) ou bien s'inscrire dans une logique de compétition. Dans les scénarios proposés les deux cas sont présents : les **scénarios 1 et 2/3** introduisent des contraintes et le **scénario 4** correspond à la compétition, il est, dans ce sens, plus désagrégé.

Rappelons les dynamiques qui ont été identifiées :

Tableau 1. Les différents acteurs de la dynamique d'occupation du sol.

	actions / acteurs	agents
(1)	actions publics favorables au développement (AD)	agents globaux
(2)	actions publics favorables aux freinage (AF)	agents globaux
(3)	propriétaires fonciers (PF)	agents individuels ou par groupes
(4)	constructeurs (CL)	agents globaux
(5)	actions des MD (ménages demandeurs)	agents dynamiques
(6)	actions de freinage des MR (ménages résidents)	agents individuels ou par groupes
(7)	<i>acteurs économiques (création de services)</i>	<i>agents individuels (entreprises)</i> ⁹

Ces actions réagissent sur

Tableau 2. Actions possibles des différents acteurs.

	agent	contexte	actions / acteurs
(E)	agents espace	création de zones constructible ...	(1), (2), (3), (4), (5), (6)
(S)	agents statiques	actions sur infrastructure	(3), (4), (7)

Nous partons du principe que les dynamiques identifiées n'entrent pas en jeu de la même façon dans tous les quatre scénarios. Elles régissent surtout la dynamique dans le cas d'un libre jeu des acteurs du **scénario 4** (typique pour la situation actuelle). En revanche les **scénarios 1 et 2/3** traduisent une politique plus volontariste, dans laquelle le libre jeu des acteurs est limité par des contraintes imposées. **Nous proposons d'introduire un concept de modélisation qui permet d'intégrer sans problèmes ces différentes situations à travers un paramétrage. Le concept introduit des fonctions qui ont la forme d'un potentiel et nous interprétons ce potentiel comme loi de distribution stochastique.** Elle sert à déterminer la fréquence des événements considérés, et à les distribuer selon ces fréquences dans les zones constructibles¹⁰. Cette approche est particulièrement adaptée à des scénarios qui introduisent le jeu des acteurs à une échelle semi-agrégée. A travers le choix de certains paramètres il est possible de modifier les fréquences d'implantation de zones constructibles en fonction d'une politique choisie (par exemple **scénarios 1 et 2/3**).

L'approche « semi-agrégée » suggérée intègre plusieurs des actions de façon globale : Actions (1), (2), (3) et (6).

Dans le contexte donné il paraît possible d'associer toutes les actions qui sont directement ((1), (2)) ou indirectement ((3), (4), (6)) liées à la décision de déclarer des zones constructibles.

⁹ Uniquement considéré dans un contexte précis (voir plus loin).

¹⁰ Les processus de décisions sont considérés comme indépendants l'un de l'autre.

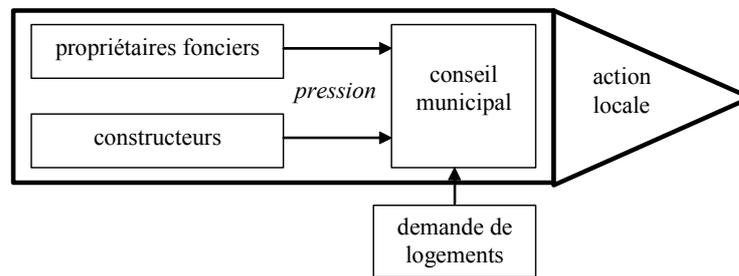


Figure 11. Emergence de l’action locale à partir des acteurs individuels.

a. Potentiel de déclaration en zone constructible

Il est proposé d’introduire un potentiel (probabilité) p_i pour la décision de déclarer une zone constructible dans une commune i qui peut dépendre du niveau de fonction k de cette commune (bourg-centre...). Nous distinguons plusieurs catégories de construction l (maisons individuelles, collectif locatif, copropriété, HLM). Nous proposons une formalisation dans laquelle p_i est décomposée selon une logique multiplicative en plusieurs termes :

$$p_i \equiv p_i^{(k,l)} = v_i^{(l)} \times \xi \times w_i^{(k)} \times \varpi_i^{(k)} \times f(x,y) \times c$$

Avec :

- (a) $v_i^{(l)}$: l’influence du marché foncier sur la « probabilité » de déclaration de nouvelles zones constructibles au marché ;
- (b) ξ : l’influence des coûts sur la reconversion de friches industrielles ;
- (c) $w_i^{(k)}$: la prise en compte des phénomènes de freinage (parties (2), (6) de la première version) ;
- (d) $\varpi_i^{(k)}$: l’influence de l’accessibilité de la commune i de niveau k sur la déclaration de nouvelles zones constructibles ;
- (e) $f(x,y)$: le choix de la zone particulière (x,y) à l’échelle locale de la commune i .
- (f) c : constante de normalisation éventuelle.

Les facteurs sont considéré comme étant indépendant mais conjointement décisif pour le jeu des acteurs.

Tableau 3. Paramètres et variables qui interviennent dans la déclaration de nouvelles zones constructibles.

paramètre/ variable		source
$g_i^{(l)}$	influence du profil résidentiel de la commune l sur sa stratégie de développement	expert et enquête auprès de décideurs (échelle « floue »)
γ	élasticité réaction demande foncière	expert, littérature ou estimation (données)
μ_f	paramètre de position	
$D^{(l)}$	demande logements/terrains, type l	sortie modèle
$O^{(l)}$	offre actuel logements/terrains, type l	sortie modèle
$m_i^{(l)}$	nombre de logements disponibles, type l , commune i	sortie modèle
$M_i^{(l)}$	nombre terrains constructibles, type l , commune i	sortie modèle
$S_{lot}^{(l)}$	taille lot, type l , commune i	de préférence observation
η	changement d’attitude par rapport à la conversion de friches industrielles	difficile à estimer, éventuellement à remplacer par version simplifiée
c_{conv}	coût unité spatiale conversion friche industrielle	experts, littérature

μ_{conv}	μ_{conv} est le coût de l'unité spatiale accepté pour la reconversion	experts
α	élasticité distance	dépend de la taille d'agglomération, calibrage selon bassin d'attraction
b_k	attractivité d'un niveau k	- évaluation à discuter-
r_k	distance réelle de la commune I au centre de niveau k	calcul SIG
r_{min}	distance minimale (bordure centre)	à fixer empiriquement (taille de la commune, SIG)
β	changement d'attitude par rapport à un futur agrandissement de la commune	difficile à estimer, à tester, éventuellement à remplacer par version simplifiée
n_i	nombre d'habitants commune i	sortie modèle
μ_k	taille critique de commune de niveau k	expert

b. L'influence du marché foncier

Nous proposons d'introduire un terme $v_i^{(l)}$ qui décrit **l'influence du marché foncier** sur la déclaration potentielle de zones constructibles et qui remplace le terme $g(d)$ de la première version du modèle. Nous supposons que ce terme dépend de la demande actuelle sur le marché du logement. Nous proposons donc de calculer (pour chaque période – par exemple pour chaque année) la demande de logements (interne au système de peuplement considéré) en fonction du vieillissement de la population. Ceci permet une ventilation de la demande par **catégorie de logements** l considérée. Cette demande soit désignée par $D^{(l)}$. En revanche on connaît également la disponibilité de terrains constructibles ainsi que de maisons et de logements vacants que nous désignons par $O^{(l)}$. Nous supposons que la demande insatisfaite par le marché ($D^{(l)} - O^{(l)}$) représente la « *driving force* » de la déclaration de zones constructibles. Nous suggérons de nouveau une formalisation sous forme de fonction logistique :

$$v_i^{(l)} = \frac{g_i^{(l)}}{e^{\gamma(\mu_f - (D^{(l)} - O^{(l)}))} + 1}$$

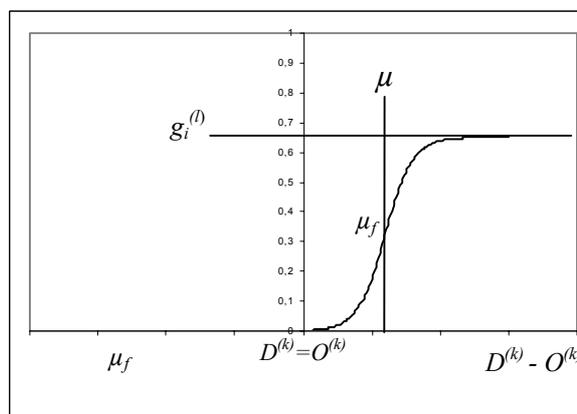


Figure 12. Influence du marché foncier sur la déclaration de zones constructibles.

Dans cette fonction le poids $g_i^{(l)}$ décrit l'influence du profil résidentiel de la commune i sur sa stratégie de développement. On peut en effet supposer qu'une commune résidentielle proposant de l'habitat « haut de gamme » aura la tendance de poursuivre son développement dans le même esprit (rétroaction positive).

Le paramètre $g_i^{(l)}$ pourrait

- soit être obtenu par une enquête auprès des décideurs en leur proposant un questionnaire sur leurs préférences (se situant entre 0 et 1 pour le développement de zones des différents types l . La réponse pourrait être mise en relation avec la situation actuelle qui est observée à travers la part de logements existants $m_i^{(l)} / \sum_l m_i^{(l)}$ actuelles.
- en absence d'enquêtes des experts pourrait être entendus dans la même optique ;
- un version simplifié serait d'associer le facteur $g_i^{(l)}$ directement à la part de logements actuelle $m_i^{(l)} / \sum_l m_i^{(l)}$ du type l :

$$g_i^{(l)} = \frac{m_i^{(l)}}{\sum_l m_i^{(l)}}$$

Cette volonté politique peut être modifiée par une réglementation qui oblige les communes à prévoir des quotas de logements du type l . Dans ce cas le facteur $g_i^{(l)}$ sera égal à la part de logements ainsi demandée.

Le paramètre μ_f et « l'élasticité » γ indiquent la réactivité des décideurs par rapport à la demande foncière :

- μ_f donne la position de la valeur $v_i^{(l)} = 0,5 \times g_i^{(l)}$ par rapport à la situation d'équilibre du marché $D^{(l)} = O^{(l)}$;
- « l'élasticité » γ indique si les décideurs réagissent fortement ou non à une augmentation du déséquilibre foncier.

Les deux paramètres conditionnent ainsi la dynamique du système. Ils pourraient en principe être obtenus à travers des observations antérieures sur la dynamique du marché foncier. A court terme on devrait consulter un expert.

La fonction $v_i^{(l)}$ augmente en fonction du déséquilibre entre offre et demande. Nous supposons que chaque commune étant en mesure de fournir des terrains réagit selon une stratégie propre, sans s'accorder avec les autres communes (ce qui peut aboutir à terme à une offre trop élevée – donc une situation hors équilibre – ce qui n'est pas irréaliste (spéculation). La fonction logistique n'est évidemment jamais égale à zéro. En principe ceci peut exprimer la tendance de vouloir attirer des résidents par la création d'une offre, mais il est également possible de définir $v_i^{(l)} = 0$ pour des valeurs $O^{(k)} > D^{(k)}$.

c. La taille des lots (maisons individuelles)

Nous supposons qu'il existe une taille de lots typique pour chaque commune. Cette taille peut varier dans une fourchette assez large (5 ares à 20 ares, par exemple). Il serait utile de recourir à des **données empiriques** à l'échelle des communes (dire d'experts locaux, agences d'urbanisme, POS...).

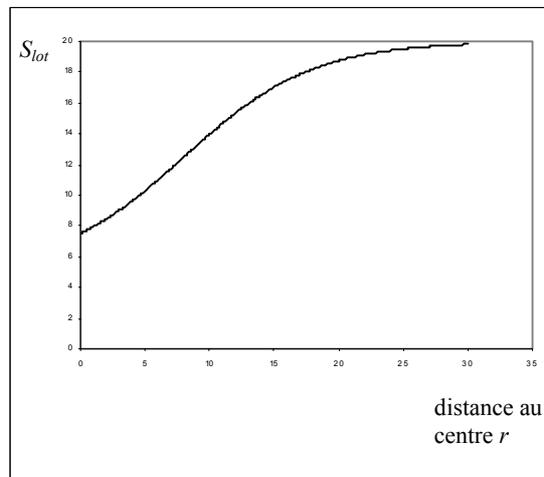


Figure 13. Evolution de la surface des lots en fonction de la distance au centre.

Si aucune information n'est disponible, on pourrait imaginer d'estimer la taille également selon un modèle simple qui prend en compte une hausse progressive de la taille des lots en fonction de la distance à la ville-centre. Il s'agit donc d'un simple modèle radio-concentrique. Une formalisation logistique serait possible en passant progressivement d'une taille plus petite des lots à proximité de la ville centre vers des tailles plus importantes :

$$S_{lot} = \frac{S_{lot,max} - S_{lot,min}}{e^{\zeta(r-\mu_r)} + 1} + S_{lot,min}$$

Soulignons toutefois qu'il serait préférable d'utiliser des données empiriques.

d. La réserve foncière générée

La taille du lot permet de calculer le nombre $M_i^{(l)}$ de terrains générées du type (l) dans la commune i , si on table sur une taille de lotissement de $S_{unité}$ (500m × 500m) :

$$S_{unité} = S_{public} + M_i^{(l)} \times S_{lot}^{(l)}$$

où S_{public} est la surface moyenne occupée par la voirie etc. ; on estime habituellement

$$S_{public} = 0,4 \times S_{unité}$$

d'où

$$M_i^{(l)} = \frac{0,6 \times S_{unité}}{S_{lot}^{(l)}}$$

e. Densification et conversion

Nous conseillons de ne pas prendre en compte une ***densification à posteriori*** d'une zone. Ceci nécessiterait un remembrement foncier ce qui est rare. Une exception serait la restructuration complète d'une zone (conversion), par exemple d'une friche industrielle ou d'un quartier insalubre.

La **conversion** de zones peut être modélisée de la même façon que la création d'une zone, en ajoutant un facteur « dissuasif » dû au coût de reconversion qui peut être pris en compte par un facteur supplémentaire :

$$\xi = \frac{1}{e^{\eta(c_{conv} - \mu_{conv})} + 1}$$

où c_{conv} est le prix par m^2 typique pour un reconversion (prix dépendant du type de travaux (démolition, dépollution...) à effectuer. En revanche, μ_{conv} est le prix par m^2 accepté pour la reconversion. Comme il s'agit dans le contexte européen plutôt d'une décision relevant des autorités publiques, il s'agit d'un prix à fixer en tenant compte de la situation donnée. En s'appuyant sur des expériences, il est possible de connaître c_{conv} et μ_{conv} . Le paramètre η permet de tenir compte d'un passage progressif d'une attitude en faveur de la conversion à un refus. Le paramètre est certainement difficile à estimer il pourrait être remplacé par le cas limite d'une « fonction Θ » ayant la caractéristique :

$$\Theta(x) = 0 \text{ si } x < 0 \quad \text{et} \quad \Theta(x) = 1 \text{ si } x > 0$$

Ici la fonction à choisir serait $\Theta(-x)$.

f. Prise en compte des phénomènes de freinage

Pour le terme de freinage, la formalisation suivante est proposée :

$$w_i^{(k)} = \frac{1}{e^{\beta(n_i - \mu_k)} + 1}$$

Avec :

n_i = nombre d'habitant de la commune i

μ_k = taille critique de commune, peut dépendre du niveau des fonctions de la commune (bourg-centre...) et du contexte régional (à discuter, pour Besançon on pourrait par exemple introduire un seuil de $\mu \approx 3000$ pour les communes périurbaine type bourg-centre).

β = paramètre de forme

Nous précisons que β décrit le passage progressif vers un refus de l'urbanisation. Sa signification ressemble à celle de η . Ce paramètre est certainement difficile à estimer, on devrait tester des valeurs différentes ; il pourrait éventuellement être remplacé par une fonction Θ .

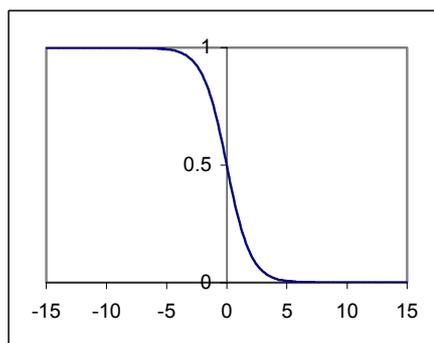


Figure 14. Fonction de type logistique.

La fonction choisie est une fonction logistique. Elle permet de mettre en évidence la baisse de la probabilité (fréquence) de déclaration de zone constructible dès que la taille critique μ de la commune est atteinte. Elle rend ainsi compte des actions (2) et (6). Si ces phénomènes ne sont pas à prendre en compte (par une planification stricte) on peut choisir $\beta = 0$. Ceci est recommandé pour le **scénario 2/3**. Le facteur c est le facteur de normalisation des probabilités.

g. L'influence de l'accessibilité

La fonction $\varpi_i(x,y)$ exprime le degré d'accessibilité de la commune i , appartenant à un niveau de fonctions k . Nous supposons donc que plus une zone est éloignée d'un centre de services, moins la probabilité est grande qu'une zone constructible soit déclarée. Nous mesurons les distances (éventuellement distance-temps (solution optimale (route, TC)) $r_{k'}$ aux centre de service de niveau k' le plus proche (ce terme est particulièrement important pour le **scénario 2/3**).

$$\varpi_i^{(k)} = \prod_{k'} \frac{b_{k'}}{(r_{k'} + r_{\min})^\alpha}$$

Différents effets de distances se superposent donc. La fonction choisie est décroissante en fonction des distances $r_{k'}$. Elle traduit (de façon classique) l'effet dissuasif de la distance. On peut par ailleurs supposer que le choix de la fonction $\varpi_i^{(k)}$ correspond d'une certaine manière à une « logique fractale »¹¹, d'où l'intérêt pour les **scénarios 2/3**. Le facteur $b_{k'}$ est un facteur qui peut servir à caractériser l'importance de l'offre de service de la commune fournissant les services de niveau k' . Ainsi il est supposé que l'aire de chalandise soit proportionnelle à l'offre de services. Ce facteur peut prendre la même valeur pour toutes les communes appartenant à un certain niveau k' si l'on suppose un équipement équivalent de toutes les communes de ce niveau (théorie des lieux centraux) ce qui est notamment intéressant pour les **scénarios 2/3**.

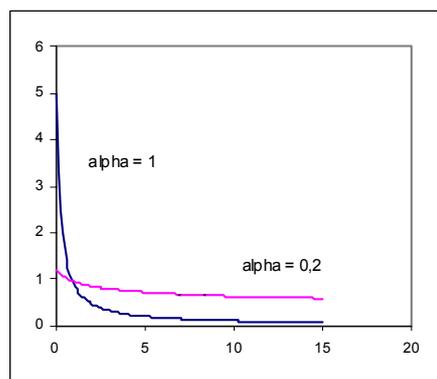


Figure 15. Représentation de l'accessibilité.

Le paramètre α décrit l'influence de la distance aux centres de services sur la déclaration de zones constructibles. Sa valeur déterminera le degré de l'étalement urbain. Une valeur proche de zéro

¹¹ Certains processus stochastiques génèrent des structures fractales, notamment les vols de Lévy. Il s'agit d'une loi hyperbolique pour la séquence des distances observées pour une promenade aléatoire. En outre il est connu que les processus de diffusion et de percolation génèrent de telles structures. Ceci a beaucoup influencé les modèles basés sur les automates cellulaires qui simulent l'émergence de telles structures (DLA, DBM). Ceci est également le cas pour certains modèles de ségrégation (par exemple modèle de Schelling ou de Phipps) ou des modèles de propagation de feu de forêt ou de croissance de tumeur.

correspond à une influence faible de la distance sur la déclaration de zones constructibles. Cette situation est surtout à explorer pour le scénario 4. Le paramètre α dépend en principe

- a) de façon générale du coût du carburant ;
- b) de la taille de la ville-centre (on accepte des distances plus importantes à Paris qu'à Rennes ou Besançon).

L'influence du coût de carburant n'est pas encore très importante pour le moment. Ceci pourrait changer à terme (prix du pétrole). Il existe des estimations qui donnent un seuil critique à partir duquel le prix du carburant influence le comportement des ménages. La dépendance de la distance devrait être ajusté selon l'agglomération par exemple à travers l'étendu du bassin d'emploi. Pour une distance plus importante que cette valeur-limite le terme $\frac{b_1}{(r_1 + r_{\min})^\alpha}$ devrait pratiquement disparaître (passage au rural profond)¹².

Pour l'évaluation des différents niveaux k il est nécessaire d'introduire une liste des services caractéristiques de ce niveau. Cette liste peut aussi servir à évaluer le niveau d'équipement réel d'une commune i . Il est proposé d'introduire dans cet objectif des « **vecteurs d'attributs** » pour chaque niveau k qui se présentent par exemple de façon suivante

$$\begin{bmatrix} \text{école primaire [0,1]} \\ \text{collège [0,1]} \\ \text{supermarché [0,1]} \\ \text{bureau de poste [0,1]} \\ \dots \end{bmatrix}$$

Il serait ainsi possible d'évaluer le niveau d'équipement à travers le codage de la présence [1] / absence [0] de services en calculant la somme des valeurs qui permet de calculer le degré d'équipement de i par rapport à une « exigence théorique » correspondant à k .

Le paramètre b_k joue un rôle important dans le modèle, il décrit l'attractivité d'une commune de niveau k . **La façon dont on déterminera la valeur définitive de b_k doit cependant encore être déterminée.** De nouveau deux approches sont possible :

- à travers une approche inductive en se référant à la croissance observée en fonction de la distance au centre d'un certain niveau ;
- à travers un raisonnement « ad hoc » (approche déductive)

h. Le choix de la maille particulière

Jusqu'ici nous avons considéré la configuration spatiale à l'échelle de l'agglomération. Le facteur $f(x,y)$ décrit la probabilité du choix d'une zone à l'échelle locale (l'endroit à l'échelle de la commune). Si le « potentiel » $\varpi_i^{(k)}$ donne déjà une information générale sur la revendication de l'accessibilité, deux informations doivent être prises en compte par ce facteur :

- la localisation concrète dans la commune
- la taille de la zone

¹² Signalons toutefois que cette distance limite n'a cessé de croître depuis la motorisation).

En ce qui concerne la **taille**, nous supposons que l'étendu d'un lotissement périurbain est environ $500m \times 500m$ (ce qui correspond à la taille de la maille proposée par ATN)¹³.

Pour la **localisation** nous proposons la logique suivante :



- définition du voisinage : selon Moore, donc :
- condition minimale : au moins une cellule voisine doit être occupée (bâti continu) ;
- intégration de l'action (6) : celle-ci tend à freiner l'implantation de nouvelles zones à proximité de site habités. A l'échelle locale cet effet peut être traduit par un poids affecté aux différentes configurations possibles¹⁴.

Tableau 4. Exemple de règles de voisinage pour l'évaluation des transitions non bâti / bâti.

nombre de zones voisines occupés	évaluation par les résidents voisins	poids probabiliste (normalisation à introduire)
1 ou 2	acceptable	0,8
3	moins acceptable	0,2
4 à 8	refus	0

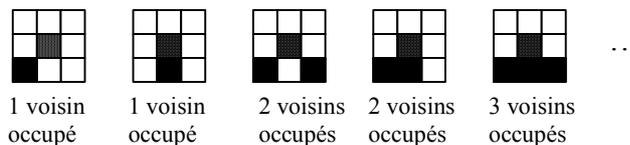


Figure 16. Exemples de configurations de voisinage.

Notons que ces règles prennent en compte la « dynamique de blocage » qui est supposée être à l'origine de « l'effet téragone » (émergence d'une bordure tortueuse).

Précisions pour les scénarios

Scénario 1 : ville monocentrique

Dans une version très dirigiste on devrait imposer $p_i(x,y) = 0$ pour toute commune autre que le centre principal : la déclaration de zones constructible ne se fait que dans la ville-centre. A ce moment les termes $w_i^{(k)}$, $\bar{w}_i^{(k)}$ et $f(x,y)$ ne s'appliquent qu'au zonage intra-urbain de la ville-centre.

¹³ L'introduction d'un maillage approche le modèle de la logique des automates cellulaires.

¹⁴ Si le voisinage est constitué de cellules vides ou occupées, il existe $\nu = \frac{1}{2} 2^{(2^9)}$ configurations possibles.

Une version plus souple admettra une tendance des acteurs locaux du périurbain de s'opposer à cette politique. Toutefois la dynamique serait faible. Ceci peut être contrôlé à travers le choix des paramètres b_k .

Scénario 2,3 : scénarios fractals

L'application de la logique fractale à l'aménagement s'exprime surtout à la définition de centre de services ayant une certaine zone de chalandise définie¹⁵. Il existe donc deux aspects :

- le degré d'équipement en service ;
- l'accessibilité.

Nous avons déjà vu que la fonction décroissante $\bar{\omega}_i^{(k)}$ est susceptible de faire émerger des tissus fractals à travers une logique d'accessibilité. Si on souhaite promouvoir le développement surtout dans les centres secondaires etc. au détriment de la « rase campagne », il est incontournable de promouvoir ces centres. Ceci est possible en jouant sur le paramètre b_k qui est associé au degré d'équipement en service d'une commune. Une logique fractale supposerait qu'il existe une relation du genre

$$b^{(k-1)} = m \times b^{(k)} \quad m = \text{constante}$$

qui caractérise une logique d'emboîtement d'échelle stricte¹⁶ (cf. page suivante).

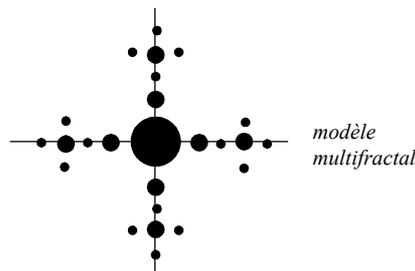


Figure 17. Illustration d'un scénario fractal.

Les scénarios 2/3 imposeraient donc le degré d'équipement pour chaque niveau hiérarchique k .

Notons que l'approche fractale nécessite également la définition du nombre de centres à chaque échelle. Nous proposons que l'utilisateur définisse, lors d'une étape préliminaire, les centres secondaires qu'il souhaite développer. Alors le nombre N de centres de ce genre est connu. A chaque centre devrait être associé un nombre N de sous-centres. Ceci pourrait être réalisé en faisant varier le paramètre α qui permet de modifier la portée des aires de chalandises (*à voir*).

¹⁵ Il n'existe pas de règle directement applicable dans le contexte donné dont il est possible d'affirmer qu'elle génère des distributions fractales. Nous introduisons donc le modèle fractal plutôt à travers un raisonnement « fonctionnel ».

¹⁶ Soulignons qu'il est possible que le niveau qui suit celui de la ville centre peut être absent, si la zone étudiée est trop petite.

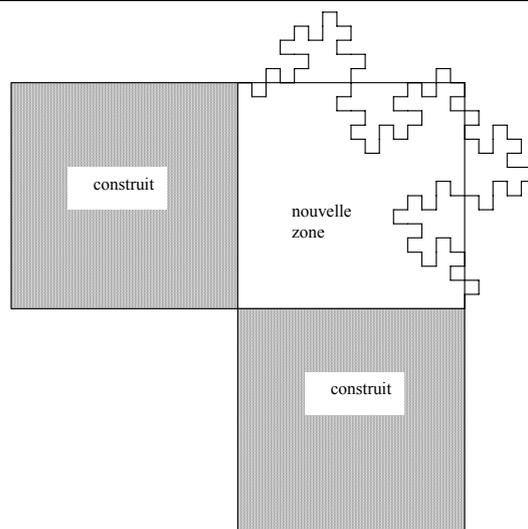


Figure 18. Aménagement fractal volontaire.

Il est proposé d'introduire dans ce modèle l'hypothèse d'un aménagement fractal volontaire des bordures urbaines. Ceci peut être pris en compte en introduisant un facteur qui augmente le nombre de parcelles situées en bordure d'un lotissement en direction du paysage ouvert (côtés du carré non connectés à la zone bâtie). Pour ces parcelles il est supposé qu'elles offrent une meilleure attractivité sur le marché foncier, mais que leur prix est plus élevé.

Scénario 4 : étalement libéral

L'approche devrait être sans contraintes particulière d'aménagement. Les b_k expriment le degré d'équipement des communes. Dans cette version la *dynamique* (7) (création de services par des acteurs économiques) est importante. Pour ce type d'action le même type de formalisation est proposé comme pour les acteurs Entreprises (modélisation économique à travers une fonction d'utilité).

5. AGENTS MENAGES

5.1. VUE D'ENSEMBLE SUR LES BOUCLES DE CALCUL « MENAGES »

Initialisation de la simulation

Lecture des paramètres de projection

Démographie des ménages (boucle annuelle)

Calcul des paramètres financiers et démographiques de l'année courante

Simulation des événements démographiques

Décès

Ruptures d'unions

Mise en réserve des candidats pour former un couple

Mises en couple

Naissances

Calcul de l'âge de fin d'étude

Emancipation des enfants

Simulation de l'occupation principale

Transitions entre domicile, école, collège, lycée, études

Entrée dans la vie active des étudiants

Transitions entre l'emploi et le chômage pour les actifs

Mises en préretraite

Départs à la retraite

Migrations

Individus créés par duplication d'individus déjà présents

Satisfaction des Ménages

Calcul des revenus des ménages

Calcul des budgets Logement et Transport

Marché de l'emploi

Marché immobilier

Mise à jour du parc VP

Mobilité quotidienne

Programme d'activités hebdomadaires des ménages

Boucle d'activités quotidiennes des individus

Choix modal

Matrices Origines/Destinations

Affectation au réseau

Actualisation des matrices coût et temps

Extrapolations sur un an

Emissions CO2

Kms parcourus

Temps cumulé de transport

5.2. INITIALISATION DE LA SIMULATION

L'objectif est de pouvoir générer la population initiale à partir des données d'entrée par zone.

L'agent **Ménage** a pour attributs :

- la taille (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 personnes),
- le type de cohabitation (personne seule, couple sans enfant, famille monoparentale, famille),
- la liste des individus qui en font partie,
- la référence au chef de famille,
- le revenu (et le budget Logement / Transport),
- le logement occupé (type, prix, surface),
- le nombre de véhicules (VP),
- les déplacements effectués au cours d'une journée (par motifs, heures et lieux),
- le degré de satisfaction.

L'objet **Individu** est doté des caractéristiques suivantes :

- sexe (M / F),
- âge,
- âge de fin d'études,
- ménage de référence,
- entreprise de référence,
- statut dans le ménage (enfant, célibataire, conjoint, parent),
- revenu (par catégories / fonction de l'âge et de l'âge de fin d'études),
- durée des déplacements au cours d'une journée,
- permis de conduire (oui / non).

L'objet **Logement** est doté des caractéristiques suivantes :

- superficie ou taille (studio, F1, F2, F3, F4, F5+),
- âge ou qualité (4 états : mauvais, moyen, bon, très bon),
- type (individuel / collectif),
- occupation (propriétaire / locataire privé / locataire public),
- prix (en fonction de la zone et des caractéristiques du logement).

5.3. LECTURE DES PARAMETRES DE PROJECTION

L'utilisateur pourra modifier graphiquement dans l'interface d'utilisateur les scénarios de projection sur 2005-2025, en particulier :

- l'indice de fécondité,
- l'âge moyen de fin d'études,

- les flux migratoires (nombre de migrants et structure des populations immigrée et émigrée),
- l'activité économique (taux de chômage).

5.4. DEMOGRAPHIE DES MENAGES

Calcul des paramètres financiers et démographiques de l'année courante :

- actualisation des tables de mortalité,
- calcul de l'âge moyen de fin d'études de la génération,
- révision des taux de primo-nuptialité,
- actualisation des salaires et des loyers (inflation, élasticité Offre / Demande).

La structure de cette boucle sur les ménages est principalement basée sur le modèle DESTINIE développé par l'INSEE.

5.4.1. Décès

a. De l'espérance de vie aux taux de mortalité

Notons :

- QM (a) le quotient de mortalité à l'âge a,
- A l'âge « limite »,
- E l'espérance de vie,
- c un coefficient de calage de la distribution.

Equation :
$$QM(a) = \exp\left(\frac{E}{c} \cdot (a - A)\right)$$

Données :

- A = 115 ans (on suppose que la vie dans MobiSim est limitée à 115 ans) ;
- c = 920 (le coefficient a été calibré sur une distribution correspondant à une espérance de vie de 80 ans) ;
- E sera donné comme scénario en différenciant l'espérance de vie des femmes (83,8 en France en 2004) et celle des hommes (76,7 en France en 2004).

b. Projection des taux de mortalité

Pour les quotients de mortalité par sexe, âge et année, on peut :

- utiliser les tables de projection de l'INED (Données : Tables de mortalité par sexe, âge et année (INED) 1998-2102. [Homme : INEDTableauIII-c-1.doc ; Femme : INEDTableauIII-c-2.doc]) ;
- les calculer à partir des formules de DESTINIE :

$$QM_{sa}(n) = \exp\left[\ln QM_{sa}(1989) + (n - 1989) \cdot \frac{\ln QM_{sa}(2049) - \ln QM_{sa}(1989)}{2049 - 1989}\right]$$

On peut remplacer 1989 et 2049 par deux autres années de référence.

- utiliser la projection de l'espérance de vie et utiliser la formule (6.4.1.a).

c. Impact de l'âge de fin d'études sur les taux de mortalité

Nous pourrions aussi inclure un différentiel de mortalité en fonction des catégories socio-professionnelles (modèle DESTINIE, p.49).

La correction par l'âge de fin d'études semble avoir des effets non négligeables. Cependant, dans un premier temps nous ne prendrons pas cette correction en compte faute de données. Néanmoins, nous continuons les recherches bibliographiques pour pouvoir donner des valeurs aux différents paramètres utilisés.

Notons :

- s le sexe,
- a l'âge,
- e l'âge de fin d'études ($e = F_{individu}$),
- $F_{génération}$ l'âge de fin d'études moyen de la génération de l'individu,
- F_{rel} l'âge de fin d'études relatif,
- QM le quotient de mortalité.

$$\text{Equations :} \quad QM_{sea} = \alpha_{se} + \beta_{se} \cdot \ln\left(\frac{QM_{sa}}{1 - QM_{sa}}\right)$$

$$\alpha_{se} = \alpha_{1s} + \alpha_{2s} \cdot \ln(F_{rel})$$

$$\beta_{se} = \beta_{1s} + \beta_{2s} \cdot \ln(F_{rel})$$

$$F_{rel} = 16 + F_{individu} - F_{génération}$$

5.4.2. Ruptures d'unions

a. Divortialité

La dissolution des unions est modélisée à partir des taux de divortialité corrigés de façon à rendre compte des séparations plus fréquentes des couples non mariés (Tableau 5).

Taux de divortialité : données INSEE (par durée de l'union) divortialité.xls (L'intensité finale des divorces est égale à 35% répartie entre 1 et 40 ans de mariage avec un mode estimé à 3 ans). On a utilisé une fonction de distribution LogNormale qu'on a calée sur les données de 2001 (fichier divortialité.xls). Les données sont disponibles dans le fichier Distribution.xls. La Figure 19 donne l'allure de la courbe obtenue.

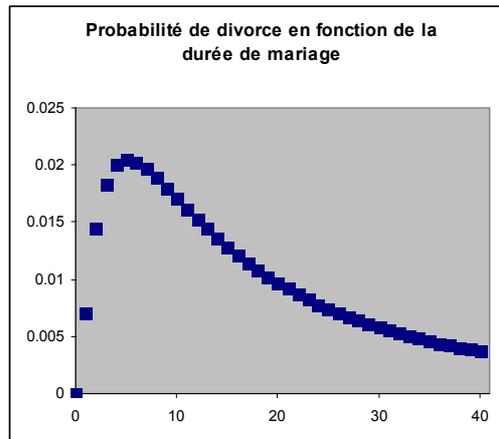


Figure 19. Probabilité de divorce en fonction de la durée de mariage.

Tableau 5. Coefficients de passage des taux de divorces observés aux taux de ruptures.

Durée de l'union (années)	Age de l'individu	
	18 à 30 ans	> 30 ans
0-2	4	2
3-5	3.5	1.75
6-8	2.3	
9-12	1.75	
13-19	1	
20-29	1	
30-40	1	

b. Garde des enfants

Lorsque des couples avec enfants divorcent, les enfants restent dans le ménage de la mère avec une certaine probabilité p ; ils partent avec le père avec la probabilité $(1 - p)$.

Par défaut, nous pourrions prendre $p = 0,9$ en 2000 (donnée prise sur www.divorce-famille.net) et proposer comme scénario une évolution jusqu'à $p = 0,7$ à l'horizon 2025.

5.4.3. Mise en réserve des candidats pour former un couple

Calcul de la probabilité individuelle de se mettre en couple :

0 si l'individu a un conjoint ;

$P(\text{sexe, âge, âge de fin d'études, rang de l'union})$ si l'individu n'a pas de conjoint.

On distingue la primo-nuptialité et la remise en couple.

a. Primo-nuptialité

Pour prendre en compte la part croissante des unions hors mariage, le taux de primo-union par sexe et âge est calculé en appliquant pour chaque tranche d'âge un coefficient multiplicateur au taux de primo-nuptialité issu des données de l'état civil (Tableau 6).

Tableau 6. Coefficient multiplicateur appliqué au taux de primo-nuptialité.

Tranche d'âge	18- 20	21 - 24	25 - 28	29 - 35	36 - 54	55 - 65	65 et plus
Coefficient multiplicateur	1,25	1,75	1,5	1,4	1,25	1	0

Taux de primo-nuptialité : données INSEE (par sexe et par âge) *Primo-nuptialité.doc*. L'intensité finale de primo-nuptialité est égale à 93% répartie entre 16 et 49 ans pour les femmes avec un mode estimé à 26 ans ; répartie entre 18 et 50 ans pour les hommes, avec un mode à 28 ans. Nous présentons ci-dessous les courbes pour la femme et pour l'homme. Les données sont dans le fichier Distribution.xls (en rose pour les femmes et en bleu pour les hommes).

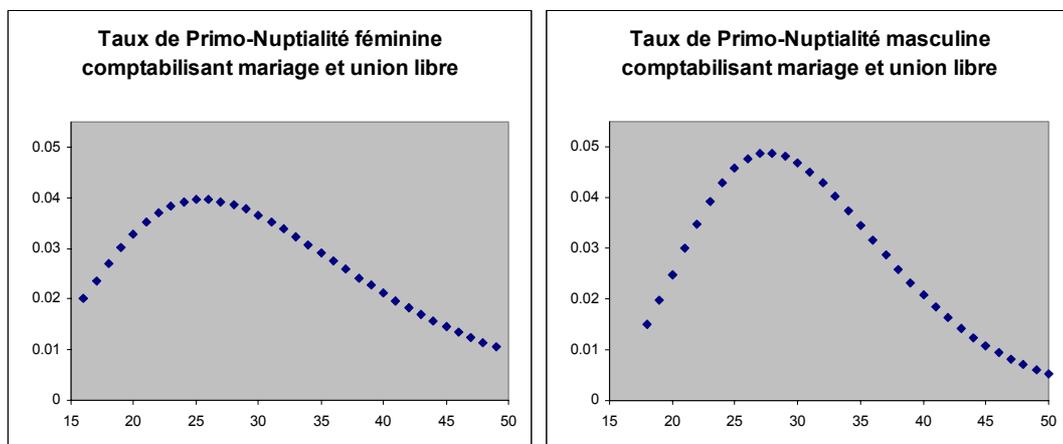


Figure 20. Taux de primo-nuptialité (gauche : femme ; droite : homme).

La probabilité est nulle en dehors des intervalles [16 ; 49] pour les femmes et [18 ; 50] pour les hommes.

Décalage en fonction de l'âge de fin d'études :

- On fait l'hypothèse que les individus ne peuvent vivre une première union qu'une fois leurs études terminées ;
- La tranche d'âge prise en compte n'est pas l'âge exact de l'individu mais relative à la valeur suivante : $\text{âge} - E[0.2 \cdot (F - 19)]$ avec E : partie entière (mathématique) et F : âge de fin d'étude.

On propose de calculer l'âge éventuel de première mise en couple à la naissance (après le calcul de l'âge de fin d'études) par tirage aléatoire d'un nombre entre 0 et 1 : si ce nombre appartient à

l'intervalle $\left[\sum_{a < A} p_a, \sum_{a < A+1} p_a \right]$ alors l'âge de première mise en couple est A.

b. Remises en couple

Les personnes veuves ou séparées peuvent être candidates à une nouvelle union dès l'année suivante.

Taux de remise en couple = fonction affine (taux de primo union)

Paramètres = fonction (sexe, âge, temps écoulé depuis la séparation)

On fait l'hypothèse que les hommes ont une probabilité de se remettre en couple plus forte que les femmes. Nous utilisons les résultats publiés par Isabelle Robert-Bobée dans « Les comportements démographiques dans le modèle de microsimulation DESTINIE » (Septembre 2002). La figure ci-après donne l'allure des courbes. On obtient des intensités finales de remise en couple (au bout de vingt ans) de 88 et 75% pour les hommes et les femmes respectivement. Les valeurs sont accessibles dans le fichier Distribution.xls.

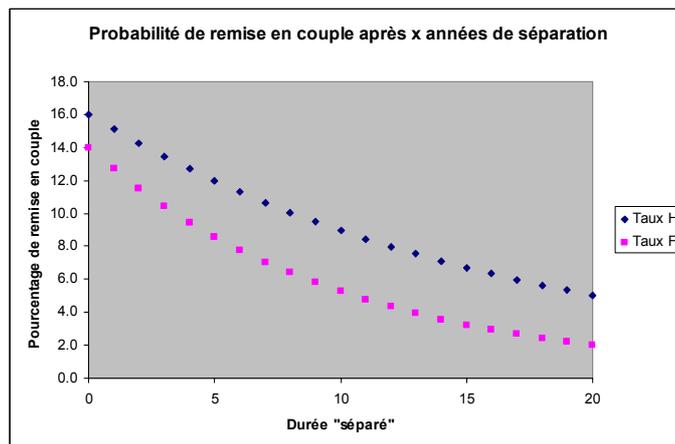


Figure 21. Probabilité de remise en couple en fonction de la durée de séparation.

La remise en couple diminue avec l'âge. On multiplie donc les probabilités de remise en couple en fonction de la durée de séparation par un coefficient d'ajustement qui suit la courbe de primo-union (100% jusqu'au pic de primo-union puis une décroissance proportionnelle à la décroissance de la primo-union).

On calcule l'âge éventuel de remise en couple à la rupture précédente (après divorce ou veuvage) par tirage aléatoire d'un nombre entre 0 et 1 : si ce nombre appartient à l'intervalle $\left[\sum_{a < A} p_a, \sum_{a < A+1} p_a \right]$ alors l'âge de remise en couple est A.

5.4.4. Mises en couple

a. Tirage aléatoire des rencontres entre candidats à l'union

Pour chaque femme sur la liste des femmes disponibles à l'union, on tire aléatoirement sept hommes candidats.

b. Formation des unions

Des sept candidats, on choisit celui qui minimise le critère d'écart d'âges :

$$(\hat{a}_{\text{Homme}} - \hat{a}_{\text{Femme}} - 3)^2 + (F_{\text{Homme}} - F_{\text{Femme}})^2$$

Choix du logement au moment de la mise en couple ?

Les ménages modifiés et les nouveaux ménages intègrent la liste des chercheurs de logement.

5.4.5. Naissances

Hypothèses : on suppose que les enfants ne peuvent naître qu'au sein d'un couple dont la femme a entre

15 et 49 ans et qu'une même femme ne peut avoir plus de 7 enfants. Les probabilités d'agrandissement de la descendance utilisées dans le modèle correspondent à un indice conjoncturel de fertilité égal à 1,827 (données INSEE / France Métropolitaine 1999).

La probabilité qu'une femme donne naissance à un enfant dépend :

- de l'âge de la mère,
- du rang de l'enfant,
- du dernier événement familial (durée de l'état matrimonial pour le premier enfant et durée écoulée depuis la naissance de l'enfant précédent pour les enfants de rang supérieur à 1).

Il faut attribuer un sexe à chaque nouvel enfant. Il peut être tiré au hasard avec une probabilité de 0,5.

a. De l'indice de fertilité aux probabilités d'agrandissement de la descendance

Nous considérons l'indice de fécondité comme un paramètre du scénario d'évolution démographique. Par défaut, cet indice aura pour valeur 1,827.

Il faut ensuite désagréger cet indice de fécondité en donnant des valeurs aux probabilités d'agrandissement. Pour ce faire, nous pouvons formuler l'hypothèse que pour des indices de fécondité inférieurs à 2,03, la répartition des enfants par taille de familles ne varie pas et nous gardons la répartition utilisée dans le modèle DESTINIE.

Notons :

- $p_o(n)$ la probabilité d'agrandissement de la famille pour le $n^{\text{ème}}$ enfant donnée dans le modèle DESTINIE (cf. Tableau ci-dessous) ;
- $p(n)$ la probabilité d'agrandissement de la famille pour le $n^{\text{ème}}$ enfant ;
- I_o la valeur par défaut de l'indice de fertilité (1,827) ;
- I_s la valeur de l'indice de fertilité donnée par l'utilisateur ($0 < I_s < 2,03$).

Nous prendrons :

$$p(1) = \frac{I_s}{I_o} p_o(1)$$

$$\forall n \in [2;7] \quad p(n) = p_o(n)$$

Données :

Tableau 7. Probabilité d'agrandissement de la famille en fonction du rang du nouvel enfant.

Nombre d'enfants (n)	Probabilité d'agrandissement [p _o (n)]
1	0.90
2	0.68
3	0.36
4	0.27
5	0.36
6	0.44
7	0.46

b. Naissance du premier enfant

La probabilité d'agrandissement de la descendance (égale à 90% cf. Tableau 6) est répartie sur les 10 ans qui suivent la première union de la mère avec un mode fixé à 3 ans.

La naissance du premier enfant est simulée par tirage aléatoire. La probabilité que l'enfant naisse après n année d'union est donnée par le produit de la probabilité d'agrandissement de la descendance à 1 enfant [p (1)] par le coefficient de répartition sur dix ans donné dans le tableau suivant :

Tableau 8. Répartition des naissances du premier enfant en fonction de la durée d'union.

Durée de l'union	Répartition de la naissance du premier enfant sur dix ans
1	0.08472
2	0.13325
3	0.13900
4	0.12963
5	0.11600
6	0.10209
7	0.08929
8	0.07800
9	0.06821
10	0.05980

La probabilité est supposée nulle au-delà de dix ans.

La figure suivante illustre la probabilité de naissance du premier enfant dans le cas d'un indice de fécondité égal à 1,827 (valeur par défaut) qui donne 90% de probabilité totale de naissance d'au moins un enfant par couple.

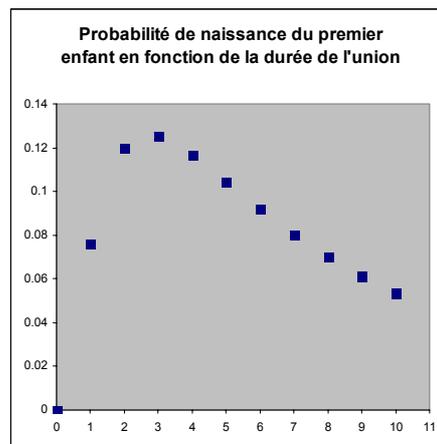


Figure 22. Probabilité de naissance du premier enfant en fonction de la durée d'union.

Cette répartition donne une durée moyenne de cinq ans environ entre la mise en union et la naissance du premier enfant. On pourra éventuellement revoir ultérieurement cette répartition avec des données plus précises sur les durées d'union avant la naissance du premier enfant.

c. Naissance des enfants de rang supérieur à 1

Cas sans rupture : la probabilité d'agrandissement de la descendance est répartie sur les 10 ans qui suivent la naissance du dernier enfant avec un mode fixé à 4 ans.

Cas avec rupture : on considère non pas l'âge du benjamin mais la valeur

$$\frac{\text{durée de l'état matrimonial} + \text{âge du benj.} - 1}{2}$$

La naissance d'un enfant de rang supérieur à 1 est simulée par tirage aléatoire. La probabilité que l'enfant de rang $(n + 1)$ naisse quand l'enfant de rang n est âgé de x ans est donnée par le produit de la probabilité d'agrandissement de la descendance à $n + 1$ enfant $[p(n + 1)]$ par le coefficient de répartition sur dix ans donné dans le tableau suivant :

Tableau 9. Répartition des naissances d'un nouvel enfant en fonction de l'âge du dernier enfant.

Age du dernier enfant	Répartition de la naissance d'un nouvel enfant sur dix ans
1	0.00928
2	0.11356
3	0.20168
4	0.20344
5	0.16306
6	0.11739
7	0.08015
8	0.05333
9	0.03509
10	0.02303

La Figure 23 donne l'allure de la courbe de répartition sur dix ans (la probabilité est supposée nulle au-delà de dix ans).

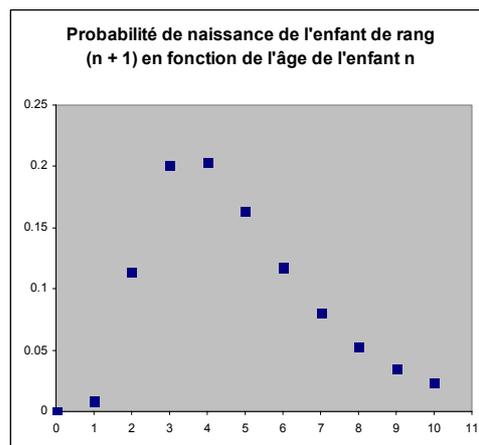


Figure 23. Probabilité de naissance du $(n+1)$ ème enfant en fonction de l'âge de l'enfant de rang n .

Cette répartition donne un écart moyen entre deux enfants successifs d'un peu plus de quatre ans et demi. On pourra éventuellement revoir cette distribution avec des données plus précises sur les écarts d'âge entre frères et sœurs.

Attention ! Il faut multiplier par un facteur de correction les probabilités d'agrandissement de la famille : (Nombre de femmes ayant n enfants) / (Nombre de femmes ayant n enfants et remplissant les conditions pour en avoir un $n+1$ ème).

Conditions pour avoir un enfant : être en couple et être âgée de moins de 50 ans. Ce facteur de correction prend en compte le fait que la probabilité d'avoir un enfant en plus n 'est pas indépendante des conditions d'avoir un enfant.

5.4.6. Calcul de l'âge de fin d'études

On procède en deux temps :

- calcul de l'âge moyen de fin d'études (f) de la génération née l'année a ;
- calcul de l'âge de fin d'études de l'enfant en fonction de l'âge de fin d'études moyen de sa

génération et de ceux de ses parents.

a. Calcul de l'âge moyen de fin d'études (f) de la génération née l'année a :

$$f = \frac{24A + 15}{A + 1} \text{ avec } A = \exp(0.0692a - 136)$$

Cette fonction peut définir l'âge de fin d'études moyen de la génération née l'année a (Figure 24). Elle pourra être remplacée par l'utilisateur par une fonction graphique ou on peut également mettre un curseur sur l'âge moyen de fin d'études maximal (ici 24 ans).

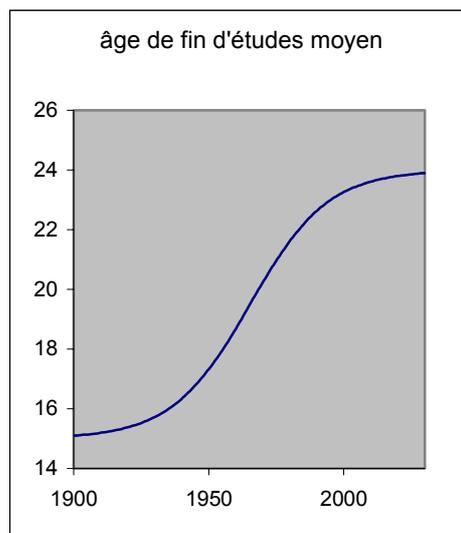


Figure 24. Evolution de l'âge moyen de fin d'études.

b. Ecart entre l'âge de fin d'études d'un individu et l'âge de fin d'études moyen de sa génération :

$$F_{\text{enfant}} - F_{g_enfant} = 0.45 \cdot (F_{\text{père}} - F_{g_père}) + 0.31 \cdot (F_{\text{mère}} - F_{g_mère}) + 2.67 \cdot N(0,1)$$

Il faut également attribuer un âge de fin d'études aux nouveaux arrivants dans l'aire urbaine en fonction de leur typologie.

5.4.7. Emancipation des enfants

Pour chaque individu, on fait un tirage aléatoire dans une loi uniforme d'un nombre entre 0 et 1 et on compare ce nombre à la probabilité de s'emanciper. S'il est inférieur à la valeur du Tableau 10 (en fonction du sexe et de l'âge de l'individu), l'enfant fonde un nouveau ménage.

Remarque : on peut optimiser le test en ne faisant tirer un nombre aléatoire que si la probabilité de fonder un ménage est différente de 0 et de 1.

Tableau 10. Probabilité de départ du domicile parental non consécutif à une mise en couple.

Sexe	Age	Valeur de la probabilité
Homme	moins de 24 ans	0
	24 ans et plus	$Min \left[\frac{\text{durée de l'emploi}}{18 - \frac{F_{\text{enfant}}}{2}}, 1 \right]$
Femme	moins de 22 ans	0
	22 ans et plus	$Min \left[\frac{\text{durée de l'emploi}}{17 - \frac{F_{\text{enfant}}}{2}}, 1 \right]$

5.4.8. Migrations

Il faut récolter des données pour étayer des scénarios prospectifs de migration (immigration et émigration) ; caractériser les types de ménages susceptibles d'arriver dans l'aire urbaine ou de la quitter (étudiants, retraités, actifs d'un secteur d'activité particulier ...). Les recensements de 1990 et de 1999 peuvent donner des indications sur les personnes qui sont arrivées dans l'aire urbaine. Il faut aussi chercher des données sur les personnes qui quittent l'aire urbaine.

5.5. SIMULATION DE L'OCCUPATION PRINCIPALE

5.5.1. Transitions entre domicile, école, collège, lycée, études

Tableau 11. Déroulement « normal » de la scolarité d'un enfant.

Etablissement fréquenté	Age en scolarité « normale »	Transition
Domicile / Crèche	0-2	Niveau supérieur
Ecole maternelle	3-5	Niveau supérieur
Ecole primaire	6-11	Niveau supérieur
Collège	12-15	Niveau supérieur
Lycée	16-18	Niveau supérieur ou Age de fin d'études
Etudes universitaires	19-28	Age de fin d'études

On peut raccourcir la durée de chaque cycle d'une année avec une probabilité de 5% et la rallonger d'une année avec une probabilité de 20%. Dans 75% des cas, chaque cycle aura la durée « normale ». Ces pourcentages ne reposent pas sur des données faute d'en avoir trouvées pour le moment.

Le détail des différents niveaux scolaires est à adapter en fonction du découpage zonal choisi et de la carte scolaire locale (a priori, les « petites écoles » doivent être à proximité des logements et doivent ainsi pouvoir être traitées en intrazone). On pourra donc simplifier le schéma en prenant le cycle : Ecole / Collège / Lycée / Enseignement supérieur.

5.5.2. Entrée dans la vie active des étudiants

La fin de scolarité d'un individu est programmée dès sa naissance à partir du calcul de son âge de fin

d'études (cf. plus haut). Il est supposé qu'un individu n'entre pas en inactivité stricte après ses études ni qu'un individu puisse reprendre ultérieurement ses études.

5.5.3. Transitions entre l'activité et l'inactivité

Elles sont calculées à partir de probabilités fonction :

- du sexe,
- de l'âge,
- de l'âge de fin d'études,
- et pour les femmes, du nombre et de l'âge des enfants.

Tableau 12. Coefficients d'estimation de la probabilité d'être actif en fonction de son statut courant, de son sexe, de son âge et de son âge de fin d'études (ainsi que du nombre d'enfants pour les femmes). (Logit multinomial, DESTINIE)

	Constante	Femmes	Hommes
		3.64 (42.0)	5.60 (41.8)
INACTIF en (t-1)	Statut en (t-1) inactif=1, actif=0	-5.35 (43.9)	-6.6 (28.9)
	[16;29]	0.65 (8.0)	0.96 (5.2)
	[30;44]	0 (Ref)	0 (Ref)
	[45;54]	-0.82 (8.7)	-0.69 (3.1)
	[55;64]	-2.10 (15.9)	-1.67 (7.7)
	[14;16]	0 (Ref)	-0.57 (3.1)
	[17;19]	0.27 (4.0)	0 (Ref)
	[20 et plus]	0.44 (5.1)	0.48 (1.9)
	Pas d'enfant	0 (Ref)	-
	1 ou 2 enfants	0.00 (0.0)	-
	3 enfants et plus	-0.38 (3.7)	-
	Pas d'enfant de moins de 3 ans	0 (Ref)	-
	Au moins un enfant de moins de 3 ans	-0.55 (5.9)	-
ACTIF en (t-1)	Statut en (t-1) inactif=1, actif=0	0 (Ref)	0 (Ref)
	[16;29]	-0.24 (3.0)	-0.40 (2.2)
	[30;44]	0 (Ref)	0 (Ref)
	[45;54]	-0.43 (4.4)	-1.23 (7.9)
	[55;64]	-2.17 (23.4)	-3.97 (30.6)
	[14;16]	0 (Ref)	-0.21 (2.5)
	[17;19]	0.41 (6.5)	0 (Ref)
	[20 et plus]	0.80 (9.6)	0.4 (3.2)
	Pas d'enfant	0 (Ref)	-
	1 ou 2 enfants	-0.23 (2.8)	-
	3 enfants et plus	-1.41 (12.1)	-
	Pas d'enfant de moins de 3 ans	0 (Ref)	-
	Au moins un enfant de moins de 3 ans	-1.55 (18.3)	-

Source : Enquête Emploi 1991 (Insee)

5.5.4. Transitions entre l'emploi et le chômage pour les actifs

Elles sont calculées à partir de probabilités fonction :

- du sexe,
- de l'âge,
- de l'âge de fin d'études.

Les probabilités sont fixées en fonction de deux scénarios distincts de chômage fixent le niveau de chômage en 2020 : 6% et 10%.

Tableau 13. coefficients d'estimation de la probabilité de trouver un emploi en fonction de son statut courant, de son sexe, de son âge et de son âge de fin d'études. (Logit multinomial, DESTINIE)

		Femmes	Hommes
	Constante	2.97 (47.8)	3.32 (59.6)
	Statut en (t-1)	0 (Ref)	0 (Ref)
	[16;29]	-1.09 (16.6)	-1.15 (18.2)
	[30;44]	0 (Ref)	0 (Ref)
EMPLOI en (t-1)	[45;54]	0.38 (4.0)	0.35 (3.8)
	[55;64]	0.37 (2.9)	0.22 (1.8)
	[14;16]	0 (Ref)	0 (Ref)
	[17;19]	0.26 (3.8)	0.33 (5.2)
	[20 et plus]	0.75 (8.8)	0.67 (8.2)
	Statut en (t-1)	-3.48 (36.6)	-3.64 (39.1)
	[16;29]	0.23 (2.8)	0.39 (4.2)
	[30;44]	0 (Ref)	0 (Ref)
	[45;54]	-0.49 (4.0)	-0.51 (4.1)
CHOMAGE en (t-1)	[55;64]	-2.26 (10.1)	-1.62 (9.2)
	[14;16]	0 (Ref)	0 (Ref)
	[17;19]	0.23 (2.7)	0.42 (4.6)
	[20 et plus]	0.52 (4.5)	0.66 (5.2)

Source : Enquête Emploi 1991 (Insee)

La perte de l'emploi est également subordonnée à la situation de l'entreprise. Une entreprise en déclin licenciera ses employés dans l'ordre de leur probabilité de perdre leur emploi.

5.5.5. Mises en préretraite

A partir de 55 ans, 15% des inactifs ont une probabilité nulle de transition vers l'activité.

5.5.6. Départ à la retraite

En théorie, entre 60 et 65 ans en fonction du nombre d'années travaillées. Plus simplement en fonction de l'âge de fin d'étude (42 ans après l'âge de fin d'études) en fixant 65 ans comme âge maximum de départ à la retraite.

5.5.7. Calcul des revenus des ménages¹⁷

Le revenu d'un individu est fonction de son sexe, de son âge et de son âge de fin d'études ainsi que de son temps d'activité (ancienneté). Les salaires sont revus annuellement en fonction de l'inflation.

Notons :

- w_{it} le salaire de l'individu i l'année t ,
- $x_{it} \cdot \beta$ l'effet de l'âge de fin d'études et de la durée d'emploi sur le salaire,
- u_i l'effet individuel permanent qui caractérise la « qualité intrinsèque » de l'individu,
- v_{it}

Equations :

$$\ln(w_{it}) = x_{it} \cdot \beta + u_i + v_{it}$$

$$x_{it} \cdot \beta = a + b \cdot F_{individu} + c \cdot D_{emploi} + d \cdot D_{emploi}^2$$

$$u_i \in \mathcal{N}(0, \sigma_u^2)$$

$$v_{it} = \gamma \cdot v_{it-1} + \eta_{it} \text{ avec } -1 < \gamma < 1$$

$$\eta_i \in \mathcal{N}(0, \sigma_\eta^2)$$

$$\sigma_v^2 = \frac{\sigma_\eta^2}{1 - \gamma^2}$$

Tableau 14. Paramètres des calculs de salaires (DESTINIE).

Paramètres	Sexe	
	Homme	Femme
a	9,772	8,273
b	0,094	0,098
c	0,046	0,053
d	- 0,00063	- 0,00068
σ_u^2	$\sigma_u^2 = \lambda \cdot V(w_{io})$	
σ_v^2	$\sigma_v^2 = (1 - \lambda) \cdot V(w_{io})$	
σ_η^2	$\sigma_\eta^2 = (1 - \gamma^2) \cdot \sigma_v^2$	
γ	0,031	
λ	0,62	

Pour paramétrer le modèle, il suffit donc d'avoir une estimation de la variance des données initiales sur les salaires.

¹⁷ Cf. Chapitre 5 Modèle DESTINIE : les carrières salariales.

Le modèle de base agrège tous les individus, qu'ils soient à temps partiel ou à temps complet, initialement salariés du public, du privé ou travailleurs indépendants. Cette agrégation est peut-être à l'origine des différences très fortes entre les hommes et les femmes (le modèle simule des salaires moyens 3 à 4 fois supérieurs pour l'homme ! L'application à l'aire urbaine de Rennes sera l'occasion de vérifier les données).

5.5.8. Allocations de retour à l'emploi

A calculer en fonction du dernier salaire perçu avec un coefficient dégressif au cours du temps.

5.6. SATISFACTION

5.6.1. Fonction d'utilité

Nous devons définir une fonction d'utilité pour l'agent ménage qui prenne en compte les critères de satisfaction propres au ménage et leur préférence.

Recherche d'emploi => Marché du travail

Recherche de logement => Marché immobilier

5.6.2. Gestion du parc automobile

On caractérisera les véhicules en fonction :

- du type de véhicule,
- des caractéristiques vis-à-vis des émissions de CO2.

Les ménages ont la possibilité d'acheter une nouvelle voiture en fonction de leur satisfaction, de leur budget et de leur propension à se déplacer en voiture.

Extrapolations sur un an : Emissions CO2, Kms parcourus, Temps cumulé de transport.

Durée de vie moyenne des véhicules en France = 7 ans (Réf. : *Quels transports pour la France d'ici la milieu du siècle ?* Jean-Noël Herman. La Jaune et la Rouge n° 603 Mars 2005)

5.7. MOBILITE RESIDENTIELLE

Cet aspect est à l'interface du parc immobilier (cf. Agents Espace 4.2.1) et du marché immobilier (cf. partie 8).

Les logements sont gérés de façon mésoscopique (dynamique des systèmes) en tenant compte des caractéristiques suivantes :

- superficie ou taille (studio, F1, F2, F3, F4, F5+),
- âge et qualité du logement (4 états : mauvais, moyen, bon, très bon),
- type (individuel / collectif),
- occupation (propriétaire / locataire privé / locataire public),
- environnement fonctionnel (accessibilité, proximité commerces, infrastructures),
- prix (en fonction de la zone et des caractéristiques du logement).

Principe de modélisation : nous simulons la mobilité résidentielle en quatre étapes : décision, recherche (en fonction de critères rédhibitoires : prix maximal et taille minimale du logement), choix (maximisation des préférences en fonction de critères d'agrément : localisation du logement, environnement, état ...) et acceptation.

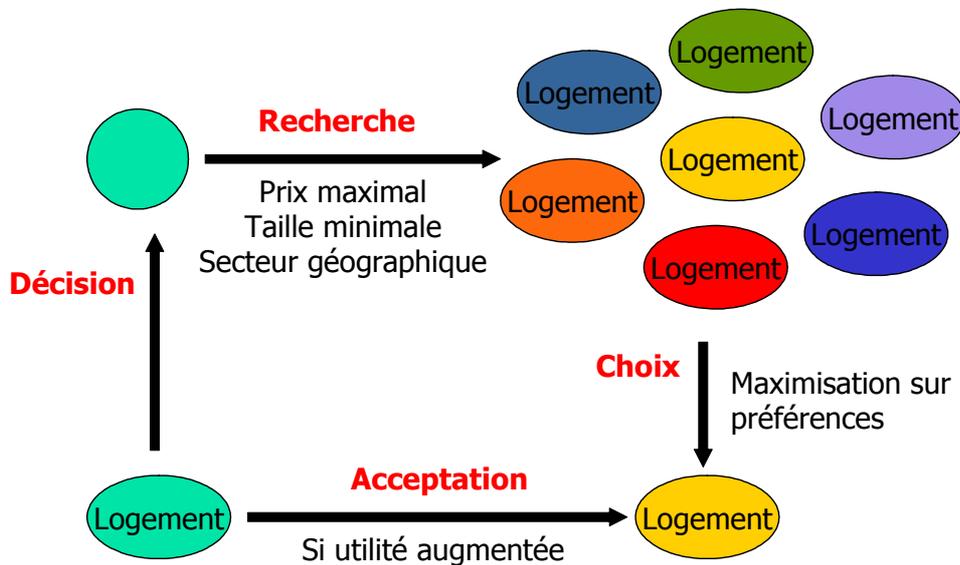


Figure 25. Les phases prises en compte dans le processus de déménagement d'un ménage.

5.7.1. Décision

La liste des ménages qui décident de chercher un logement est constituée :

- des nouveaux ménages arrivés dans l'aire urbaine (immigration),
- des ménages recomposés ou nouvellement constitués (suite au départ d'un enfant ou à la mise en couple de deux personnes),
- des ménages dont la propension à déménager est forte (insatisfaction supérieure à un seuil de tolérance de la situation présente).

La propension d'un ménage à déménager est calculée par une fonction Logit à partir des variables suivantes : taille du ménage, statut d'occupation, durée d'occupation du logement actuel, âge de la personne de référence, âge de fin d'étude (Debrand & Taffin 2004).

5.7.2. Recherche

On sélectionne un ménage parmi ceux qui recherchent un nouveau logement. En fonction de ses caractéristiques, on recherche les logements vacants qui correspondent à ses critères rédhibitoires (taille minimale et prix maximum). On tire aléatoirement sept logements dans la liste des logements vacants qui répondent aux critères.

5.7.3. Choix et Acceptation

Un ménage opte pour le logement qui maximise sa fonction d'utilité et l'accepte si sa satisfaction s'en trouve augmentée par rapport à sa situation actuelle. On réactualise les listes de logements vacants par type et par zone au fur et à mesure.

6. AGENTS ENTREPRISES

Pour simuler la démographie d'entreprises et l'évolution de l'offre d'emplois, nous distinguons trois types d'Agents Entreprises :

- les établissements particuliers du type usines, hypermarchés ou grands magasins spécialisés, et exploitations agricoles ;
- les petits commerces (supermarchés et commerces traditionnels agrégés en pôles de quartier de surface commerciale supérieure à 300 m²) ;
- les autres emplois (emplois de bureaux, secteur tertiaire, services, divers).

Nous présentons ensuite la stratégie de localisation qui permet de simuler l'implantation des entreprises individualisées (nouveaux établissements particuliers et nouveaux petits commerces) et de prendre en compte la distribution des activités agrégées (emplois de bureaux) entre les différentes zones de l'aire d'étude.

Nous présentons enfin les déplacements liés à l'activité économique (transport de marchandises).

Attributs de l'agent Entreprise (Etablissement / Pôle de quartier / Emplois de bureaux par zone) :

- référence à la maille et / ou à la zone,
- liste et nombre d'employés,
- type d'activité :
 - o Agriculture,
 - o Artisans / services,
 - o Industrie,
 - o Commerce de gros,
 - o Grands magasins,
 - o Commerce de détail,
 - o Tertiaire,
 - o Entrepôts,
- type de locaux et surface occupée,
- capacité de stationnement.

6.1. DEMOGRAPHIE DES ENTREPRISES

Nous traitons donc séparément les établissements particuliers, les commerces traditionnels et les emplois de bureaux.

6.1.1. Etablissements particuliers

Nous regroupons sous cette appellation les établissements qui font l'objet de plans particuliers d'aménagement du territoire, les établissements qui demandent des ressources particulières et qui font une utilisation du sol réglementée. Nous distinguons en particulier :

- des établissements industriels lourds : usines, ateliers, entrepôts ;
- des commerces de taille importantes : hypermarchés, grands magasins spécialisés (surface supérieure à 2500 m²) et supermarchés (surface comprise entre 400 et 2500 m²) ;

- les exploitations agricoles.

On peut gérer la dynamique de ces établissements particuliers à partir de scénarios définis pour chaque établissement et construits à partir des plans d'aménagement du territoire, des plans d'occupation du sol et des schémas de développement commercial ; ou bien utiliser les mécanismes du cycle de vie (création, maturité, extension, déclin – cf. Figure 26).

Pour les nouveaux établissements, le modèle peut simuler le choix de localisation en fonction des caractéristiques de l'établissement.

6.1.2. Commerces

Nous gérons dans cette partie les supermarchés et les commerces traditionnels agrégés en blocs de surface de vente de plus de 300 m². Ces blocs peuvent être qualifiés de pôles de quartier et sont localisés sur le maillage.

Ces pôles de quartier peuvent se trouver dans l'un des 4 états suivants (Figure 26) :

- Création (état entre la décision de création et la mise en service),
- Maturité (fonctionnement en régime normal),
- Extension (croissance caractérisée par l'augmentation de la surface et de l'effectif),
- Déclin (diminution de la surface de vente et suppression d'emplois).

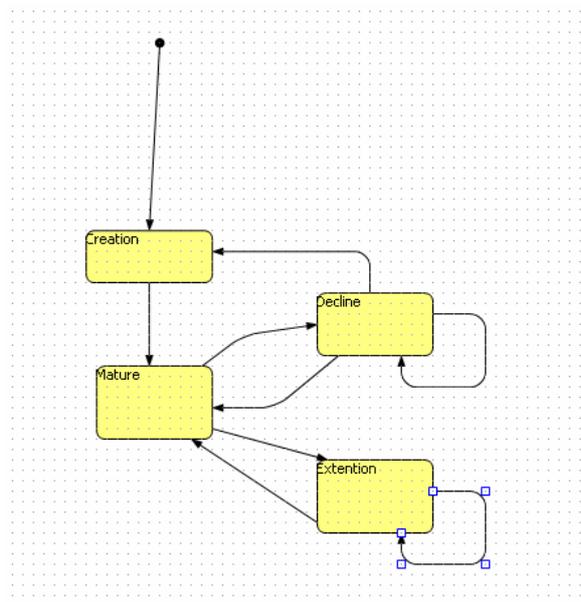


Figure 26. Diagramme d'état des pôles de quartier (commerces de proximité).

a. Evolution de la taille des pôles de quartier

Nous suivons une approche réglementaire pour simuler l'évolution de la taille des pôles de quartier. La première étape consiste à évaluer la zone d'attractivité du pôle (en fonction des dessertes de transport) et à calculer le nombre de ménages qui habitent dans le quartier et le nombre d'individus qui y travaillent (aire de chalandise). A partir de cette demande potentielle, nous calculons la surface commerciale

souhaitable du pôle de quartier. Nous calculons enfin le nombre d'emplois occupés pour le motif commerce dans le pôle de quartier. Ce nombre d'emplois évoluera au gré des fluctuations de l'attractivité de la zone.

b. Evolution du nombre de pôles de quartier

Lors de la création d'un nouveau quartier ou de la densification d'un quartier existant, un nouveau pôle de quartier peut apparaître lorsque le nombre de ménages et de travailleurs situés dans une zone en dehors des zones d'attractivités des pôles de quartier existants devient plus important qu'un seuil de développement.

Il faut alors choisir la maille dans laquelle se développe ce nouveau pôle en essayant de maximiser sa zone d'attractivité (barycentre des mailles considérées affectées d'un poids proportionnel à la population qui fréquente la maille).

6.1.3. Autres emplois

Nous classons dans « autres emplois » les emplois qui ne sont pris en compte ni dans les établissements individualisés ni dans les pôles de quartier (commerces traditionnels). Il s'agit principalement des emplois de bureaux.

Les emplois de bureaux sont considérés de façon indifférenciée (traitement mésoscopique par zone).

A partir des ménages, on dénombre la population active au temps courant t : $P(t)$.

A partir du taux de chômage au temps t ($c(t)$, scénario macro-économique), on calcule le nombre d'emplois occupés au temps t : $E(t) = [1 - c(t)] \cdot P(t)$

On retranche au nombre d'emplois total dans l'aire urbaine, les emplois du commerce et les emplois des établissements particuliers (traités séparément) $E_B(t) = E(t) - E_C(t) - E_E(t)$.

On répartit les emplois restants en d'éventuels secteurs d'activité que l'on souhaite prendre en compte à partir du scénario macro-économique sur la dynamique des différents secteurs d'activité (la distinction en différents secteurs d'activités peut se justifier pour l'estimation des déplacements générés).

On répartit enfin les emplois suivant la catégorie socio-professionnelle (structure des âges de fin d'étude) et de l'ancienneté des employés (classes d'âge ou de durée d'emploi).

La distribution des emplois de bureaux sur les différentes zones de l'aire urbaine se fait en fonction de l'offre et de la demande de locaux.

6.2. LOCALISATION DES ACTIVITES

6.2.1. Etablissements particuliers

La localisation des nouveaux établissements particuliers peut être traitée de façon exogène (scénario d'aménagement) ou endogène (simulé par le modèle). Suivant les caractéristiques de l'établissement, on définit le type de maille qui pourrait accueillir un tel établissement (en fonction de l'utilisation du sol).

On liste les mailles de cette catégorie qui dispose d'un espace libre suffisant. Et on tire au sort sept mailles candidates. On maximise ensuite la fonction d'utilité de l'établissement en fonction des critères de choix propres au type d'établissement (accessibilité, proximité clients, prix ...).

6.2.2. Commerces

Il faut d'abord déterminer les nouveaux pôles de quartier : zones dont la densité de ménages dépassent un certain seuil et qui sont hors des zones d'accessibilité des autres pôles de quartier. On choisit alors la maille qui maximise la clientèle (barycentre de la population).

6.2.3. Emplois de bureaux

La répartition des emplois de bureaux sur l'aire urbaine se fait en fonction de la disponibilité des surfaces, des coûts de location et des coûts de déménagement. On minimisera les délocalisations en prenant un coût de déménagement prohibitif. En cas de délocalisation, il faut choisir aléatoirement les employés qui suivent les emplois dans d'autres zones. Nous pouvons gérer la stratégie de localisation des entreprises en utilisant une fonction d'utilité qui prenne en compte à la fois les critères d'accessibilité, les critères de coût, et des critères de proximité.

Suivant les études statistiques quantitatives effectuées sur le sujet, nous pourrions adapter le choix de la fonction à maximiser.

7. MARCHÉ DE L'EMPLOI

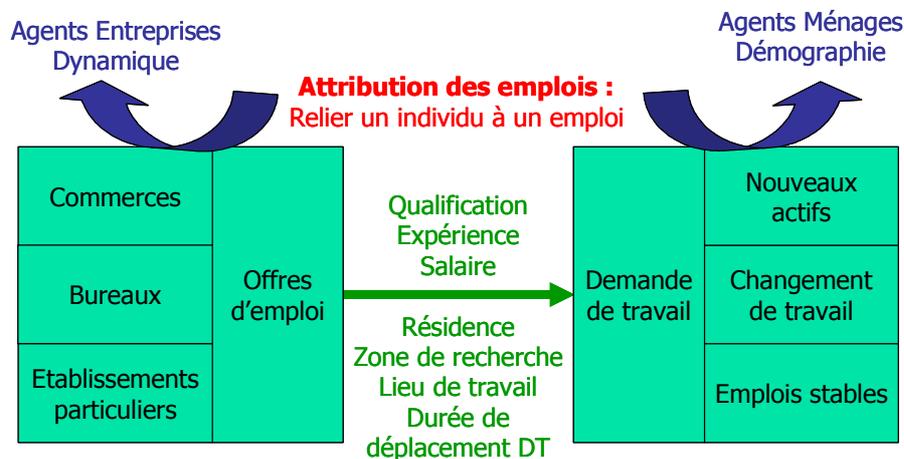


Figure 27. Modélisation du marché de l'emploi.

On découpe le marché de l'emploi en plusieurs sous-marchés en fonction du découpage qualification / ancienneté (on peut prendre pour chaque caractéristique trois ou quatre niveaux).

On effectue une première boucle sur les individus afin de réactualiser :

- La liste des inactifs (scolaires, au foyer, retraités),
- La liste des chercheurs d'emplois,
- Le nombre d'emplois offerts sur le marché du travail.

On traite dans cette boucle :

- Les transitions activité / inactivité. Pour chaque individu, le modèle démographique calcule une probabilité de transition entre états. On tire un nombre aléatoirement dans une loi uniforme entre 0 et 1, et on le compare à la probabilité de transition. Si le nombre aléatoire est inférieur à la probabilité de transition, la personne passe de l'activité à l'inactivité. On sépare les individus inactifs au foyer (âgé de moins de 65 ans) des retraités (qui ne pourront plus transiter vers l'activité).
- Les transitions emploi / chômage en licenciant les individus dont la probabilité de perdre leur emploi est supérieure au nombre tiré aléatoirement.
- Les changements d'emploi en passant temporairement sur une liste de chercheurs d'emploi prioritaires les personnes dont la probabilité de changer d'emploi est supérieure au nombre tiré aléatoirement.
- On classe les chercheurs d'emplois (inactifs et chômeurs dont la probabilité de trouver un travail est non nulle) par ordre de propension à trouver un emploi.

En fin de boucle, on calcule l'offre d'emploi par zone et par catégorie d'emplois (qualification, expérience) en ajoutant à la variation du nombre d'emplois le nombre d'emplois libérés au cours de la boucle.

A ce stade, on a d'un côté l'offre d'emplois, et de l'autre la demande (liste des chercheurs d'emploi prioritaires et liste classée des chercheurs d'emploi).

Pour l'attribution des emplois aux chercheurs d'emploi, on effectue une deuxième boucle sur les deux listes de demandeurs d'emploi, en procédant en priorité avec les demandeurs d'emploi prioritaires :

- On fixe pour chaque individu une zone de recherche d'emploi qui est fonction de son ménage (lieu résidentiel) et de son âge de fin d'étude (aire de recherche d'autant plus large que le niveau de qualification est élevé).
- On attribue dans l'ordre de la liste un emploi qui corresponde au mieux aux aspirations du demandeur d'emploi (zone préférentielle, qualification, expérience).

Le salaire est fixé en fonction de la qualification et de l'expérience.

8. MARCHE IMMOBILIER

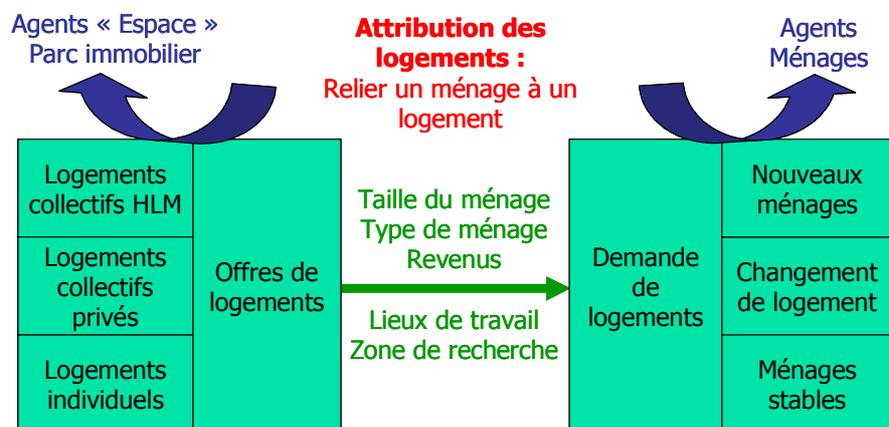


Figure 28. Modélisation du marché immobilier.

On traite séparément le marché immobilier de logements (Ménages) et le marché immobilier d'Entreprises.

8.1. LOGEMENTS

On découpe le marché immobilier en plusieurs sous-marchés en fonction du découpage type d'occupation (collectif privé, collectif public, individuel privé) / taille du logement (par catégorie en m² ou par nombre de pièces). On calcule le prix de chaque logement en fonction de ses caractéristiques et de sa localisation (dans la zone, voire au niveau de la maille par rapport aux critères d'environnement et de qualité de vie). La désagrégation de la zone à la maille peut se faire de façon statistique en fonction du pourcentage d'occupation du sol au niveau de la zone et chaque type de maille.

On effectue une première boucle sur les ménages afin de réactualiser :

- La liste des ménages sans logement (enfant qui s'émancipe, nouvel arrivant dans l'aire urbaine),
- La liste des ménages qui cherchent à déménager (ménages insatisfaits),
- Le nombre de logements vacants.

On traite dans cette boucle :

- L'émancipation des enfants ;
- L'arrivée des nouveaux immigrants ;
- Les déménagements (on inscrit dans la liste des chercheurs de logement les personnes insatisfaites par leur situation présente – ceux qui ont une probabilité de déménager supérieure à un nombre aléatoire tiré dans une loi uniforme entre 0 et 1).

En fin de boucle, on calcule l'offre de logement par zone et par catégorie de logement (type d'occupation, taille du logement) en ajoutant aux logements initialement vacants (logements vacants au pas de temps précédent, logements rénovés et nouveaux logements) le nombre de logements libérés au

cours de la boucle par les ménages qui cherchent un nouveau logement.

A ce stade, on a d'un côté l'offre de logements, et de l'autre la demande (liste des personnes qui cherchent un nouveau logement).

Pour l'attribution des logements aux ménages qui cherchent un nouveau logement, on effectue une deuxième boucle sur la liste des chercheurs de logements :

- On fixe pour chaque ménage une zone de recherche préférentielle qui est fonction des individus du ménage (lieu d'étude ou de travail) ;
- On attribue dans l'ordre de la liste un logement qui corresponde au mieux aux aspirations du ménage demandeur (prix du logement, qualité, attractivité de la zone).

8.2. LOCAUX D'ENTREPRISES

Compte tenu du traitement des entreprises, on traite séparément les locaux commerciaux, les bureaux d'entreprises et les locaux particuliers (secteur industriel, terres agricoles, entrepôts). La localisation des locaux commerciaux ne dépend que du plan de l'utilisation du sol (surface disponible) et de l'accessibilité à la clientèle. Les locaux des établissements particuliers peuvent faire le choix d'une stratégie de localisation ou être assignés à certaines mailles de type susceptible à accueillir les activités spécifiques de l'établissement. Les bureaux d'entreprises se répartissent sur les zones en fonction des critères de prix, d'accessibilité des zones et d'attractivité (fonction de l'activité de l'entreprise).

Les prix sont fixés en fonction de l'offre et de la demande de la même façon que pour les logements.

9. AGENTS STATIQUES

Il s'agit de préciser la formalisation des infrastructures de transport, le degré de détail de la description des réseaux et d'implémenter les notions de péages et de coûts des transports. Nous prendrons en compte :

- Les infrastructures VP (capacité, longueur, vitesse maximale autorisée, coût d'utilisation),
- Les réseaux TC (capacité, fréquence, durée, tarification),
- Les parcs de stationnement (capacité, tarifs).

9.1. OBJECTIFS

9.1.1. Quantifier la mobilité, son coût, ses impacts et son évolution

- Estimer les probabilités d'occurrence de congestion à l'heure de pointe
 - Prendre en compte la rétroaction du risque de congestion sur la vitesse donc sur le choix modal (éventuellement prendre en compte cette rétroaction avec un pas de retard : utiliser les durées de l'année n pour évaluer le choix modal de l'année $n + 1$)
- Evaluer le nombre de déplacements, les longueurs parcourues, les vitesses, les temps de déplacements, le choix modal par individu et par jour
 - Eventuellement calculer sur une semaine complète (en cohérence avec l'énoncé d'un programme d'activités hebdomadaire)
 - Extrapoler sur un an
- Estimer les coûts et les impacts de la mobilité
 - Aspects économiques (Analyse Efficacité / Coûts / Bénéfices ; points de vue des Ménages, des Entreprises et de la Collectivité ; estimation de la dépréciation immobilière)
 - Dimension environnementale (Emissions : Qualité de l'air, Effet de serre, Bruit ; Consommation : Espace, Energie, Ressources)
 - Dimension sociale (Santé, Risques, Accessibilité, Mixité, Equité)

9.1.2. Représenter physiquement les infrastructures VP et les réseaux TC

- Pour calculer les déplacements
- Pour définir les accessibilités et quantifier l'attractivité des zones
- Pour estimer l'impact de la mobilité (calcul des émissions et estimation de l'exposition)

9.2. INFRASTRUCTURES VP

9.2.1. Représentation

On propose deux niveaux de description :

- Une représentation des tracés physiques des autoroutes, routes principales (Nationales) et secondaires (Départementales) par un ensemble de tronçons séparés par des nœuds (échangeurs autoroutiers, carrefours entre routes principales et routes secondaires) ;
- Une représentation en trace directe (centre à centre) pour modéliser les voies de proximité qui

permettent de passer d'une zone à une zone voisine (si une connexion est possible dans la réalité).

Chaque tronçon des routes représentées physiquement sera affecté d'une longueur, d'une capacité, d'une vitesse maximale autorisée (50, 90, 110, 130 Km/h) et d'une vitesse à vide. On conservera aussi la vitesse à l'heure de pointe calculée au pas de temps précédent en fonction de la « congestion habituelle ».

Les liaisons centre à centre permettront de simuler l'offre des petites routes. Elles seront également caractérisées par leur longueur (distance « centre à centre » éventuellement affectée d'un coefficient α de rétablissement des longueurs), leur capacité (qui agrégera autant que possible les capacités des chemins réels), une vitesse maximale autorisée (30, 50, 90 Km/h) et une vitesse à vide. On conservera également la vitesse à l'heure de pointe.

9.2.2. Initialisation / Mise à jour

A partir des données sur SIG, on doit pouvoir récupérer sur des calques différents les voies individualisées (Autoroutes, Nationales et Départementales) et le réseau de proximité (connexions entre zones voisines, densité du réseau de proximité).

Pour initialiser le modèle, il faudrait trouver un algorithme qui permette de segmenter les voies individualisées en tronçons et d'affecter les valeurs de paramètres (longueur, capacité, vitesse). Par défaut, on peut découper les routes Nationales et Départementales en tronçons « zone à zone » (un nœud dans chaque zone traversée).

Pour le réseau de proximité, il faut déterminer l'existence de voies « zone à zone » et quantifier la capacité de la trace directe résultante (« centre à centre »).

A chaque modification des infrastructures VP, il faut mettre à jour l'offre de voirie VP.

9.3. PEAGES ET STATIONNEMENT

9.3.1. Différents types de péage

Nous pourrions prendre en compte différents types de péage définis en fonction de :

- La typologie spatiale : Section de route / Cordon / Zone ;
- La base tarifaire : Km / passage / forfait / durée ;
- Les variations temporaires : Heure creuse / Heure de pointe.

La prise en compte des péages nécessite d'ajouter un paramètre coût pour chaque tronçon de route. Ainsi le péage entrera en compte dans le calcul du coût généralisé et influencera le choix modal.

9.3.2. Représentation du stationnement

On propose ici aussi deux niveaux de description pour le stationnement :

- Des stationnements affectés à un lieu particulier (Entreprise, Gare, Centre commercial, Logements) ;
- Des stationnements indifférenciés en ville (voirie, parkings).

Pour ces deux types de stationnement (localisé, diffus), il faut segmenter l'offre (gratuit, payant). Les

autres paramètres à prendre en compte sont le nombre de places offertes et le caractère réservé (exemple : stationnement résidentiel, stationnement employeur, stationnement usager).

9.3.3. Initialisation / Mise à jour

On doit pouvoir obtenir les données sur les parkings payants et sur les places en voirie du centre ville. Pour les zones périurbaines on peut prendre un nombre de places sur rue proportionnel à la longueur de voirie (ou bien fixer un nombre arbitraire a priori non limitant).

Dans le cas d'une construction de logements neufs ou d'équipements (bureaux, commerces, lieux culturels ...), il faudra mettre à jour les informations concernant le stationnement.

9.4. RESEAUX TC

9.4.1. Représentation

On propose encore deux niveaux de description :

- Une représentation physique des lignes interzones en site propre (trains TER, métro, tramways, bus « grande ligne » éventuellement) ;
- Une représentation diffuse « zone à zone » pour caractériser les liaisons possibles entre zones voisines (réseau de proximité).

Les lignes physiques seront segmentées par tronçons entre gares. Chaque tronçon sera affecté d'une distance, d'une vitesse, d'une fréquence. Pour prendre en compte les trains semi-directs, il faudra sans doute implémenter les différents tronçons redondants possibles. L'autre option est d'utiliser des matrices origines / destinations en implémentant directement pour chaque service possible la fréquence, la durée, la capacité.

9.4.2. Initialisation / Mise à jour

La partie « lignes interzones » devrait être facilement mise en œuvre. Les informations à collecter sont les suivantes : localisation des gares, fréquence des tronçons, distance et temps de parcours (vitesse « usager »).

Pour les lignes de proximité, on pourra qualifier les différentes zones d'une présence / absence de TC intrazone ; on pourra également ajouter des barreaux de liaisons entre zones voisines lorsqu'il existe un TC permettant de passer d'une zone à l'autre. Pour ces deux réseaux de proximité, il faudra essayer de quantifier la capacité du réseau (éventuellement en fonction de la densité du réseau et de la fréquence des ramassages).

9.5. VERSION SIMPLIFIEE

Dans une première version, nous pouvons simplifier la prise en compte des déplacements en utilisant uniquement les distances de centre à centre pour évaluer la mobilité urbaine. Cette méthode a l'avantage de réduire les algorithmes de calcul au maximum en utilisant une matrice origines / destinations constante au cours de la simulation. Evidemment, la contrepartie, c'est qu'on ne prend pas en compte la congestion sur les réseaux, ni les modifications de l'offre.

Possibilité de ne simuler réellement qu'un douzième des Agents Ménages par mois ce qui suppose une dynamique de révision du choix modal assez lente (une fois par an) et une répartition de cette révision du choix modal sur l'année (pas de pic saisonnier du type « rentrée des classes »).

10. MODELISATION DES DEPLACEMENTS QUOTIDIENS

Une fois la formalisation des agents statiques définis, nous pouvons revenir sur la modélisation des déplacements en simulant pour les déplacements de personnes et le transport de marchandises : la congestion à l'heure de pointe d'une part, et d'autre part, le total des déplacements effectués.

10.1. DEPLACEMENTS

On récapitule dans cette partie et la suivante la façon d'estimer les déplacements et de calculer leurs impacts.

10.1.1. Intrazones

a. Déplacements de proximité

Pour gérer les déplacements de proximité, on utilise une distribution de distance centrée sur $\frac{1}{2}\sqrt{S}$ avec S la superficie de la zone et une vitesse en fonction du mode (Marche à pied, Vélo, Bus, VP). On ajoutera également du temps pour la recherche de stationnement dans le cas du déplacement VP et le cas échéant, un coût de stationnement.

En fonction des résultats obtenus avec l'introduction du maillage, on pourra substituer à la distribution des distances théoriques une distribution calculée sur le maillage (moyenne pondérée des distances entre mailles bâties en utilisant la densité de ménage comme coefficient de pondération).

b. Déplacements d'accès et à destination

Les déplacements d'accès ou à destination peuvent se faire éventuellement sur plusieurs zones et avec un mode éventuellement différent du mode principal. Ces déplacements sont calculés en distance à vol d'oiseau (centre de zone à centre de zone ou gare ou nœud du réseau VP) avec éventuellement la prise en compte d'un coefficient α de rétablissement des longueurs. α peut prendre des valeurs de 1.1 à 1.4 en fonction de la longueur du trajet (typiquement, 1.1 pour des longues distances, 1.3 en moyenne, 1.4 pour des courtes distances). Dans le cas d'un déplacement VP, il faudra tenir compte de la recherche de stationnement (temps et coût éventuel).

10.1.2. Interzones

Les déplacements interzones longue distance s'effectuent sur les réseaux physiques (réseau ferré ou TC en site propre pour les transports en commun ; autoroutes, nationales et départementales pour le réseau VP). L'affectation d'itinéraire permet de lister les tronçons fréquentés pour se déplacer d'une zone à une autre.

10.1.3. Intermodalité

L'intermodalité sera uniquement prise en compte dans le modèle comme un sous-mode des transports en commun. L'utilisation d'une VP dans ce cadre sera perçue comme un mode d'accès à la gare TC. Le déplacement sera donc découpé en trois étapes : l'accès à la gare (qui prendra en compte la recherche et le coût éventuel du stationnement), le déplacement TC principal (qui prendra en compte la fréquence et la capacité dans le temps d'attente et éventuellement sur le confort ou la qualité du service), le déplacement à destination (Marche à pied ou TC de proximité).

10.2. ALGORITHMES

La jonction entre déplacements de personnes et transport de marchandises en ville peut se faire au niveau des matrices OD.

10.2.1. Déplacements de personnes

Tableau 15. Déroulement de l’algorithme conduisant aux calculs des déplacements de personnes.

Activités	Programmes d’activités hebdomadaires des Ménages	Ménage
Boucles	Boucles d’activités journalières des Individus	Individu
Déplacements	Distribution des déplacements Origine/Destination	Individu
Motif	Motif principal (hiérarchie Travail > Etudes > Achats/Services > Loisirs)	Individu
Mode	Choix modal = f (Individu, Ménage, Motif) Mode principal / Modes d’accès et à destination	Individu
Matrices OD	Interzone Mode principal + Accès, Destination et Intrazone par mode	Zones
Itinéraires	Répartition Itinéraires – Matrice Tronçons	Tronçons
Externalités	Calcul des émissions dans Matrice Tronçons	Tronçons
Exposition	Intersection Tronçons / Mailles	Mailles

10.2.2. Transport de marchandises

Tableau 16. Déroulement de l’algorithme conduisant aux calculs des déplacements générés par le transport de marchandises en ville.

Activités	Génération des livraisons et enlèvements à partir du nombre d’emplois et en fonction du secteur d’activité	Entreprise / Zone d’emploi
Boucles	Boucles d’activités journalières des Transporteurs	Transporteur
Déplacements	Distribution des déplacements Origine/Destination	Transporteur
Matrices OD	Interzone Mode + Accès, Destination et Intrazone	Zones
Itinéraires	Répartition Itinéraires – Matrice Tronçons	Tronçons
Externalités	Calcul des émissions dans Matrice Tronçons	Tronçons
Exposition	Intersection Tronçons / Mailles	Mailles

10.2.3. Congestion à l’heure de pointe

Pour étudier l’heure de pointe, on peut éventuellement prendre un pourcentage des déplacements totaux ou aller plus dans le détail en remontant aux déplacements par motif et prendre un pourcentage différent suivant le motif. Le traitement de la congestion à l’heure de pointe nécessite d’effectuer les étapes suivantes :

- Détermination des déplacements à l’heure de pointe,
- Affectation modale,
- Itinéraire,
- Calcul sur les différents tronçons VP et TC de la fréquentation à l’heure de pointe,
- Rétro-calcul des vitesses à partir des courbes débit/vitesse (à partir de la fréquentation et en

fonction de la capacité des tronçons).

10.3. DEPLACEMENTS DE PERSONNES

Compte tenu des objectifs du modèle, nous ciblons les sorties suivantes :

- congestion des tronçons de circulation à l'heure de pointe,
- nombre de kilomètres parcourus par ménage par an,
- temps de transport domicile / travail par individu par jour,
- émissions (CO₂, bruits) et autres impacts de la mobilité.

Pour estimer les déplacements de personnes, nous suivons le schéma classique des modèles à quatre étapes (Bonnel 2004) : génération de la demande de déplacements, distribution des déplacements, répartition modale, affectation aux réseaux.

10.3.1. Génération des activités

La première étape consiste à générer la demande d'activité des ménages. La gestion du programme hebdomadaire d'activités en fonction des caractéristiques du ménage semble plus pertinente au regard de la cohérence d'approche du modèle (simulation multi-agents basé sur le comportement des ménages et des entreprises). Nous définissons d'abord les activités d'un ménage en fonction du groupe social des individus qui le composent. Nous calculons ensuite les boucles d'activités effectuées pour chaque individu. Ces activités sont définies en précisant leur durée et leur chronologie (afin de générer les boucles de déplacement). Pour la génération des activités, les individus sont définis à partir des caractéristiques suivantes : sexe, âge, âge de fin d'études, statut dans le ménage.

10.3.2. Génération des déplacements

Les itinéraires sont calculés à partir des activités programmées et de la localisation des activités. La localisation est fonction de l'emploi des individus des ménages ainsi que de la disponibilité des infrastructures les plus proches correspondant aux différentes activités (la définition de chaque zone spécifie les infrastructures disponibles : écoles, universités, gymnases, piscines, hôpitaux, commerces de proximité, supermarchés, hypermarchés, postes, services publics ...).

La localisation des différentes activités est définie en fonction des habitudes de l'individu et de l'offre d'infrastructure des différentes zones :

- Travail ou Université en fonction du lieu de l'emploi ou du lieu d'étude,
- Ecoles, Collèges, Lycées en fonction du découpage de la carte scolaire,
- Commerces de proximité dans la zone la plus proche qui concentre des activités de commerce, dans la zone de vie du ménage ou dans la zone de travail ou sur le chemin domicile – travail en fonction de la boucle de déplacement générée,
- Supermarché / Hypermarché dans la zone la plus proche,
- Loisirs dans la zone la plus proche où les infrastructures sont disponibles,
- Visites dans les zones qui se réfèrent à l'histoire du ménage (?) ou par tirage aléatoire dans l'aire urbaine.

10.3.3. Choix modal

Le choix du mode de transport est fonction de la distance à parcourir, de la possession d'une voiture, de l'activité programmée, de la possession du permis de conduire (VP conducteur/passager), du temps de parcours (choix TC/VP) et de la proximité des TC, ainsi que du coût des différents modes de transport.

On pourra utiliser une fonction d'utilité et un modèle Logit.

Les temps et les coûts généralisés découleront des calculs au pas de temps précédents.

10.3.4. Affectation aux réseaux

On doit estimer en fonction des activités réalisées et des choix modaux, la mobilité quotidienne par mode, par itinéraire et par heure. Cette fonction permet de calculer la densité d'occupation des TC et la saturation des axes VP (qui en retour permet d'ajuster les temps de transport par l'intermédiaire des courbes Vitesse/Densité).

Boucle de rétroaction pour calculer le temps de trajet :

- Nombre de VP sur chaque tronçon en fonction des heures ;
- Calcul de la vitesse de déplacement en fonction de la densité d'usagers ;
- Calcul des temps de parcours pour chaque individu.

Les matrices de coûts par mode de transports sont réactualisées à partir de ces calculs et les matrices réactualisées sont utilisées au pas de temps suivant pour le calcul du choix modal.

10.4. DEPLACEMENTS : TRANSPORT DE MARCHANDISES

10.4.1. Simulation des déplacements liés aux activités des entreprises

On estime l'ensemble des déplacements planifiés au cours de la journée ainsi que les déplacements effectués à l'heure de pointe pour estimer le taux de congestion des infrastructures.

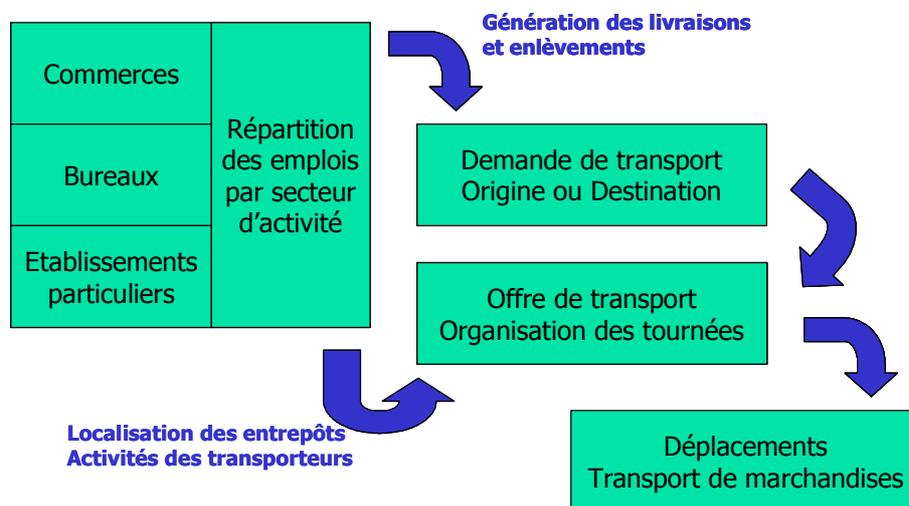


Figure 29. Prise en compte du transport de marchandises (d'après le modèle FRETURB).

Nous modélisons le transport des marchandises en ville à partir des travaux du modèle FRETURB (Figure 29) :

- génération des livraisons et enlèvements par type d'activité en fonction du nombre d'emplois,
- généralisation des boucles de déplacements à partir de la localisation des entrepôts et des établissements desservis,
- occupation de la voirie par les véhicules en stationnement par zone (en heures * UVP),
- occupation de la voirie par les véhicules en circulation par zone (en UVP * km),
- nombre total de km parcourus,

- total des émissions de CO₂.

Le modèle n'ayant pas vocation à simuler de façon réaliste le trafic, il ne prendra en compte les rétroactions entre occupation de la voirie et vitesse de déplacements sur le comportement des ménages que pour les trajets à l'heure de pointe, et ce, de façon très simplifiée en utilisant les capacités des tronçons et des courbes débit / vitesse pour réguler globalement les temps de parcours. Pour quantifier la mobilité urbaine, nous prendrons en compte l'ensemble des déplacements liés au transport de marchandises en ville ainsi que les déplacements de personnes réalisés pour les motifs « Travail », « Etudes », « Courses » et « Loisirs ».

Dans le but de prendre en compte les problèmes de stationnement et de livraisons, on peut faire une hypothèse de disjonction des espaces :

- intrazone avec prise en compte du stationnement, des livraisons et des enlèvements, et des déplacements intrazones de biens et de personnes,
- interzone (tronçons VP) avec uniquement prise en compte de la circulation de biens et de personnes (UVP).

Et on peut ainsi réduire la capacité des tronçons intrazones partiellement occupés par les livraisons pour l'estimation de la congestion à l'heure de pointe.

10.4.2. Gestion du parc automobile Entreprises

Ce module a pour objet de réactualiser le parc roulant des entreprises, notamment les caractéristiques des véhicules vis-à-vis des émissions de CO₂.

11. TABLEAU DE BORD « MOBILITE URBAINE ET DEVELOPPEMENT DURABLE »

11.1. INDICES DE DEVELOPPEMENT DURABLE

Nous avons sélectionné parmi les indicateurs définis par différents organismes internationaux (Global Reporting Initiative, Commission Européenne ...) et ceux utilisés dans le projet PROPOLIS, les indicateurs qui sont adaptés à l'appréciation de l'efficacité de la mobilité urbaine, en terme :

- De performance économique : satisfaction des besoins de mobilité, temps de parcours, efficacité des déplacements ...
- D'impact environnemental : émissions de CO₂, pollutions, nuisances sonores, qualité environnementale ...
- Et de coût social : impact sur la santé, degré de mixité sociale, accessibilités du centre-ville, des services et des aires naturelles, égales opportunités ...

Nous calculerons les valeurs de ces indicateurs à partir des sorties accessibles dans le modèle (nombre de km parcourus, temps de parcours moyen pour les déplacements « Domicile – Travail », utilisation du sol, estimation des nuisances ...).

Réf. : Ifen. 2005. 45 indicateurs de développement durable : une contribution de l'Ifen. Editeurs : Lavoux Th, Theys J. Etudes et travaux 41 : 144 pp.

11.1.1. Principe / Stratégie

Il s'agit de renseigner les indicateurs les plus pertinents, les plus renseignés dans la bibliographie. La liste complète doit présenter un panel exhaustif des aspects pris en compte. Il faut cependant se limiter à des indicateurs qui peuvent être renseignés par le modèle.

Faut-il donner uniquement les valeurs d'indicateurs ou également des valeurs d'indices agrégés ? Le projet PROPOLIS présente une discussion intéressante sur la normalisation et l'agrégation des indicateurs.

Il est possible d'envisager une monétarisation de certains indicateurs par l'intermédiaire de marchés ou de coûts externes :

- Les impacts environnementaux qui détériorent le cadre de vie peuvent avoir une répercussion sur les prix du marché immobilier ou dans le cadre de l'application du protocole de Kyoto être monétarisés sur des marchés d'échange (CO₂) ;
- Les impacts sur la société peuvent présenter des coûts en matière de santé publique (consultations, traitements, médicaments) ou affecter directement les moyens de production (absentéisme au travail).

Il serait donc partiellement possible de rendre compte du bilan financier d'une politique de transport et d'urbanisme. Pour d'autres aspects, il faudra s'en tenir à des appréciations qualitatives non monétarisées.

11.1.2. Modélisation des impacts environnementaux

A partir des sorties du modèle, relatives aux déplacements (nombre de déplacements, longueurs parcourues et vitesses) par mode, nous calculerons les impacts environnementaux du transport en ville en

trois étapes :

- Les émissions (CO₂, polluants, bruits) à partir des caractéristiques de la flotte VP et des caractéristiques des différents TC,
- L'exposition des populations aux émissions en désagrégeant l'information au niveau des mailles ;
- Les effets sur la population en fonction des caractéristiques des populations exposées.

Les items suivis d'un astérisque (*) sont développés dans le document de Nicolas *et al.* (2001) : **Les indicateurs de mobilité durable, méthodes et résultats**. L'ensemble des indicateurs (à quelques exceptions près) a été utilisé dans le projet PROPOLIS.

a. Emissions

i. CALCUL DES EMISSIONS

Effet de serre : Emissions de gaz à effet de serre (dont CO₂) *

Qualité de l'air : Emissions de polluants (composés organiques volatiles, gaz acides et particules fines) *

Bruit : Emissions sonores

Le calcul des émissions suppose de gérer à la fois les déplacements et le parc roulant. Deux possibilités sont envisageables :

- une gestion individualisée des émissions pour chaque déplacement en fonction de l'utilisateur et des VP disponibles dans le ménage ;
- une gestion plus agrégée qui quantifie globalement les déplacements effectués (matrices OD par mode) et calcule globalement les émissions (par tronçon éventuellement) en fonction des caractéristiques agrégées du parc roulant.

Références : Cauret et al. (2001), Hickman (1999), Hugrel & Joumard (2004).

Model COPERT: Computer Programme for estimating Emissions from Road Transport

Model HBEFA: Handbook Emission Factors for Road Transport.

Project ARTEMIS: Assessment and Reliability of Transport Emission Model and Inventory Systems

Project MEET: Methodologies for estimating air pollutant emissions from transport.

ii. EXPOSITION

On utilise les données désagrégées au niveau du maillage : localisation des infrastructures VP et des ménages.

iii. EFFETS¹⁸

Evaluation des effets à partir des populations exposées et des émissions

b. Consommation

Espace : Occupation du sol * ; Fragmentation des écosystèmes et des habitats

¹⁸ La prise en compte des effets environnementaux des transports fait l'objet de la partie numérotée 11.2, contribution de Guillaume FABUREL.

Energie : Consommation d'énergie

Ressources : Consommation de matières premières (carburant) * ; Biodiversité ; Production de déchets

c. *Qualité environnementale*

Qualité de vie

11.1.3. Modélisation des effets sur la société

a. *Santé*

Exposition à la pollution

Exposition au bruit

b. *Risques*

Accidents

c. *Accessibilité*

Accessibilité aux services et aux marchés

d. *Mixité*

Mixité sociale et ségrégation spatiale

e. *Equité*

Exposition relative des différentes classes socio-culturelles aux émissions

Référence : Banister et al. (1994).

11.1.4. Caractérisation de la performance économique

a. *Efficacité*

Efficacité énergétique des différents modes de transport

Emissions par mode

Comportement (charge moyenne par camion, nombre moyen de passagers par véhicule)

b. *Coûts*

Financement des infrastructures VP

Financement des réseaux TC

Coûts externes (accidents, pollution, effet de serre, bruit)

c. *Bénéfices*

Bénéfices au profit des usagers

Bénéfices au profit des opérateurs

Bénéfices au profit de l'Etat (taxes, péages)

11.2. LA PRISE EN COMPTE DES EFFETS ENVIRONNEMENTAUX DES TRANSPORTS DANS MOBISIM¹⁹

11.2.1. Justification de prise en compte des effets environnementaux des flux de transport dans une simulation multi-agent des dynamiques métropolitaines

Dans la précédente version de MobiSim (III), l'échelle macroscopique de la modélisation n'avait pas permis, pour le domaine environnemental, d'insérer les mécanismes et liaisons fonctionnelles entre Emissions, Effets et Coût Environnementaux. Nous avons toutefois admis que ces mécanismes et liaisons pourraient et devraient être traités par la facture plus microscopique et la nature multi-agents de la version suivante du modèle - chaque entité impliquée dans le mécanisme voit son comportement modélisé et les interactions résultantes quantifiées. Puisque comme nous le verrons, il existe des possibilités de renseignement de telles interactions (systèmes institutionnels de mesure et bases de données officielles et scientifiquement validées), le présent document souhaite répondre aux nécessités informationnelles et techniques de cette prise en compte dans le nouveau modèle développé par ATN.

Outre l'opportunité technique, cette nécessité d'approfondissement à l'échelle désagrégée de comportements unitaires répond aussi d'au moins une autre raison, peut-être plus fondamentale pour le devenir de ce type d'exercice. Cette autre justification implique les logiques d'acteurs et alors les dynamiques urbaines que l'on souhaite modéliser.

Pour qui veut à ce jour produire de manière pertinente des simulations de dynamiques socio-spatiales, en l'occurrence ici à l'échelle d'agglomération, ou plus simplement développer une réflexion pertinente sur le devenir des espaces urbains, la question des effets environnementaux des flux de transports, et non seulement celle des émissions, apparaît essentielle et incontournable. Ces effets prennent de plus en plus place dans les modes de pensée, discours et arbitrages de tous les acteurs impliqués par un tel devenir, acteurs dont un système multi-agents souhaite prendre en compte les comportements : ménages, acteurs du secteur marchand, pouvoirs publics...

Par exemple, suite à des travaux scientifiques fondés sur des analyses empiriques, il est maintenant admis que la qualité de l'environnement, donc que le bien être en découlant, participent des choix résidentiels des ménages, en plus des caractéristiques du logement lui-même et de spécificités territoriales essentielles à l'activité des ménages (accessibilité, offre de services et commerces... du lieu de résidence). Or, une fois agrégés, ces choix résidentiels unitaires fondent en grande partie les dynamiques territoriales, donc le devenir des espaces à long terme, par exemple urbains.

De même, les pouvoirs publics, de nos jours surtout locaux sont, dans le cadre de territorialisation de l'action, de plus en plus ouverts à la recherche de compromis au nom du développement durable (économique, social et environnemental). A cette fin, le territoire local s'affirme comme l'intégrateur de mesures nouvelles (Agenda 21 locaux, nouveaux documents d'urbanisme, gouvernance locale, HQE2R), voire de plus en plus l'incubateur de ces modes de pensée en évolution rapide. Or, par le truchement des questions saillantes adressées aux indicateurs de développement durable, à l'observation/évaluation (ex : émergence rapide des observatoires environnementaux), ou encore à la thématique naissante de la justice environnementale, les effets environnementaux des activités humaines sont amenés à focaliser bien plus qu'auparavant l'attention des donneurs d'ordre. Il en découle non seulement des productions empiriques et des exercices analytiques de plus en plus nombreux sur ces effets (qui nous serviront concrètement à renseigner les liaisons fonctionnelles du modèle), mais aussi des types d'actions et modes opératoires de leur construction qui placent progressivement la qualité de l'environnement, le vécu de bien-être ou mal-

¹⁹ Contribution de Guillaume FABUREL, Centre de Recherche sur l'Espace, les Transports, l'Environnement et les Institutions Locales, Université Paris XII

être environnemental, ou encore la sensibilité écologique des agents au centre des initiatives prises sur les territoires, aux côtés d'informations plus anciennes, telles que celles renvoyant aux deux autres piliers du développement durable (social et économique).

Certes, les multiples acteurs interagissant dans la construction des systèmes urbains n'ont pas tous une doctrine claire et identifiable sur de telles interfaces transport et environnement. L'environnement est globalement une préoccupation jeune et le rôle croissant des collectivités territoriales en la matière demeure somme toute récent. Dès lors, dans le domaine de l'environnement, une doctrine existante peut être sujette à de larges fluctuations externes comme internes à l'organisation, notamment du fait de la montée en généralité de la question environnementale à l'échelle territoriale. Il n'en demeure pas moins que tous, peu ou prou, s'ouvrent progressivement à la problématique des effets environnementaux des activités de transports, par-delà la seule question des émissions qui a longtemps guidé l'approche normative des acteurs plus historiques de ce champ (Etat).

En résumé, cet exercice de prise en compte des effets environnementaux de la mobilité urbaine dans la nouvelle génération de MobiSim trouve justification et commandement dans une faisabilité informationnelle et technique, qui elle-même découle de l'évolution de la sensibilité environnementale des agents et des modes d'actions qui l'accompagnent, avec tout ce que cela induit alors pour une modélisation pertinente du devenir des agglomérations, par exemple selon les initiatives de régulation des flux pour cause d'impacts environnementaux.

Pour mémoire, les émissions prises en compte dans le précédent modèle sont celles qui renvoient à la pollution atmosphérique locale (Nox, COV...) et à l'effet de serre (CO2). Ces données d'émissions sont livrées par les constructeurs, centralisées par le CITEPA, et ont pu être affinées par les recherches de l'INRETS (selon par exemple les types d'usage des véhicules, l'ancienneté des véhicules et alors leur génération technologique). Les données d'émissions sonores des différentes véhicules en fonctionnement dans le parc étaient quant à elles absentes du modèle.

Souhaitant passer des émissions aux effets, en vue de rendre compte des dynamiques engendrées pour la ville par les impacts environnementaux des transports, la difficulté est toute autre.

Tout d'abord, il n'existe pas à ce jour d'indices qui agrègent de manière pertinente la diversité de ces effets, sous l'angle par exemple d'un indice de qualité environnementale et encore moins de satisfaction ou de bien-être... Malgré les initiatives prises autour des indicateurs au nom du développement durable (IFEN, 2003 ; CSTB, 2004...), peu d'informations synthétiques renseignent statistiquement et de manière unique les liens entre émissions et qualité de l'environnement. En outre, les champs de la connaissance sont différemment étayés selon les effets considérés. Il est donc proposé de partir de phénomènes pris isolément et :

- dont les liens statistiques avec les doses initiales (émissions unitaires ou concentrations) s'écartent de l'ère du soupçon pour donner à voir de fortes présomptions, voire des incertitudes en voie de résorption,
- dont nous sommes sûrs qu'ils ont des effets sur les comportements individuels (choix résidentiels, pratiques de mobilité, mesures de régulation...),
- et ce faisant qu'ils constituent par le degré de sensibilité croissante des populations un sujet de préoccupation pour les pouvoirs publics (orientation des actions transports ou urbanisme par exemple).

Il nous a semblé qu'au moins trois des principaux effets environnementaux des flux de transport répondaient à ces conditions. Nous les présenterons selon un ordre qui va des effets dits « objectifs » vers ceux plus perceptifs : les *impacts immobiliers* (ex : dépréciations) imputables aux charges environnementales dues aux systèmes urbains de transports, les *effets de la pollution atmosphérique sur*

la santé, et la gêne imputable au bruit.

Le propos qui suit est structuré autour des trois types d'effets qu'il nous semble pertinent d'insérer dans le modèle, et s'achève par une réflexion plus prospective centrée sur une proposition d'indice synthétique (ici les coûts environnementaux) et sur les intérêts plus socio-politiques de ce type de modélisation et des interfaces informatiques qui lui donnent sens pour l'action publique telle qu'elle se construit à ce jour (utilité sociale des Systèmes d'Information Géographique, et alors indirectement de la simulation engagée ici, pour la conduite de débats publics et autres exercices dits de concertation).

11.2.2. Les impact immobiliers des pollutions et nuisances liées aux transports

a. Etat de la connaissance

Pour ce qui concerne les *impacts immobiliers* des pollutions et nuisances liées aux transports, et plus précisément encore les décotes immobilières, l'abondance de la littérature varie selon les pollutions et nuisances considérées.

Les effets de la qualité locale de l'air sur le prix de l'immobilier sont sujets encore à de larges incertitudes scientifiques (Gueymard, 2004). Ces dernières ne sont pas sans lien avec les caractéristiques mêmes de cette pollution : origine multiple, large diffusion, transformation physico-chimique... qui limitent la portée de l'imputabilité à une source précise. Pour partie en conséquence, l'arbitrage résidentiel des ménages au sein d'une même agglomération ne s'ouvre que peu à ce type de facteur. Même si certaines populations commencent à entretenir un rapport sensoriel (odeur, vue...) à la qualité de l'air (SHADYC, 2001), la perception de la pollution atmosphérique demeure trop globale (à l'échelle de l'agglomération) pour s'affirmer comme un indicateur d'une sensibilité localisée. Nul doute toutefois que la sensibilité croissante à la pollution atmosphérique en ville et l'information de plus en plus fine disponible sur les concentrations de polluants dans l'air et sur l'exposition des populations (PRQA) œuvreront à terme, par le truchement de l'anticipation des ménages, à des effets plus tangibles sur la valeur des logements, au moins entre les différentes couronnes d'une même agglomération.

Il en est tout autrement pour le bruit des transports et ses impacts sur le prix des logements. La littérature est abondante et propose notamment des indices de dépréciation pour cause de bruit assez fiables (dépréciation par émission d'un décibel supplémentaire), tirés de l'application de la méthode des prix hédoniques (Bonnieux et Desaignes, 1998). Les deux tableaux qui suivent donnent la mesure des efforts de recherche déjà fournis, autant qu'ils indiquent une convergence des résultats qui nous intéressent ici.

Tableau 17. Résultats de l'application de la Méthode des Prix Hédoniques au bruit routier (1970-2004).

Etude	Année d'observation	Indice de bruit	NDI*
Gamble et al.	1969-71	Leq	0,26
Anderson et Wise	1969-71	Leq	0,31
Nelson	1970	LDN	0,88
Diffey	1971	L10 (18h)	0
Vaughan-Huckins	1971-72	Leq	0,65
Hammar	1972	Leq	1,18
Hall et al.	1975	Leq	1,05
Langley	1976	Leq	0,22
Bailey	1977	Distance	0,38
Abelson	1977	L10 (18h)	0,5
Allen	1978	L10 (18h)	0,15
SEDES	1980	-	0,5
Palmquist	1980	L10 (18h)	0,28

Taylor and al.	1982	Leq	0,5
Pommerehne	1986	Leq (6h-22h)	1,26
Heinonen	1986	Leq (7h-22h)	1,22
Iten et Maggi	1989	Leq (6h-22h)	0,9
Soguel	1990	Leq (6h-22h)	0,91
Hidano et al.	1990	-	0,7
Vainio	1991	Leq (7h-22h)	0,36
CSERGER/EFTEC	1994	-	0,67
Grue et al.	1995	Leq	0,54
Renew	1996	Leq 24 / L10 (jour)	1 / 1,1
Faburel, Maleyre et Peixoto	2004	LDN	2,16

* *Noise Depreciation Index*

Source : CRETEIL (Université Paris XII), adapté de CADAS (1999) et Navrud (2002).

Tableau 18. Résultats de l'application de la Méthode des Prix Hédoniques au bruit des avions (1960-2004).

Auteur	Année d'observation	Aéroport	NDI
Paik	1960	Dallas	2.3
Paik	1960	Los Angeles	1.8
Paik	1960	New York (JFK)	1.9
Emerson	1967	Minneapolis	0.58
Gautrin	1968-69	Londres (Heathrow)	0.62
Blaylock	1970	Dallas	0.99
Nelson	1970	Buffalo	0.52
Nelson	1970	Cleveland	0.29
Nelson	1970	Nouvelle Orléans	0.4
Nelson	1970	San Diego	0.74
Nelson	1970	San Francisco	0.58
Nelson	1970	St Louis	0.51
Nelson	1970	Washington DC	1.06
Price	1970	Boston (Logan)	0.81
Maser et al.	1971	Rochester (New York)	0.75
Mieskowski et Saper	1971	Toronto (Mississauga)	0.87
Mieskowski et Saper	1971	Toronto (Etobicoke)	0.95
Abelson	1972	Sydney (KSA) 1 - Marrickville	0.4
Abelson	1972	Sydney (KSA) 2 - Rockdale	0.5
Dygert	1973	San Francisco	0.5
Dygert	1973	San José (Etats-Unis)	0.7
De Vany	1974	Dallas	0.8
MacMillan et al.	1975-76	Edmonton (Canada)	0.51
Fromme	1977	Washington (National)	1.49
Hoffmann	1977-1981	Bodø (Norvège)	0.89
SEDES	1978	Orly	0.5
Mark	1979	St Louis	0.56
O'Byrne et al.	1980	Atlanta	0.67
Pennington et al.	1985-86	Manchester	0.47
Opschoor	1986	Amsterdam	0.45
Pommerehne	1986	Bâle	0.22
Uyeno et al.	1987-88	Vancouver 1	0.65
Uyeno et al.	1987-88	Vancouver 2*	0.9
Tarassoff	1990	Montréal	0.65
Gillen et Levesque	1990	Toronto	0.48
Collins et Evans	1993	Manchester	0.87
Kaufman	1993	Reno (Etats-Unis)	0.28
BAH-FAA	1993	Baltimore	1.07

BAH-FAA	1993	Los Angeles	1.26
BAH-FAA	1993	New York (JFK)	1.20
BAH-FAA	1993	New York (La Guardia)	0.67
Levesque	1994	Winnipeg (Canada)	1.3
Myles	1995	Reno	0.37
Yamagushi	1996	Londres (Heathrow)	1.51
Yamagushi	1996	Londres (Gatwick)	2.30
Tomkins et al.	1997	Manchester	0.78
Salvi	2001	Suisse (Zurich)	0.74
Faburel, Maleyre et Peixoto	2004	France (Orly)	0,96

Source : CRETEIL (Université Paris XII), adapté de Nelson (1980) ; Pearce (1993) ; Levesque (1994) ; INRETS (1997) ; Schipper (1997) ; Levinson, Gillen, Kanafani (1998) ; Schipper, Nijkamp, Rietveld (1998) ; Van Praag, Baarsma (2000) ; Navrud (2002) ; Nelson (2004).

Le bruit des transports a un impact avéré sur la valeur des logements, qui s'exprime en NDI, ou *Noise Depreciation Index*, soit le taux de dépréciation (en % de la valeur du logement) pour cause d'un décibel supplémentaire par rapport à la borne inférieure de l'échelle de bruit constituée par l'échantillon d'analyse. Nombre des débats qui animaient la communauté scientifique sur ce sujet est dorénavant clos.

Cette solidité provient tant de la multiplicité des applications méthodologiques que de la stabilité des résultats malgré la diversité des contextes considérés (différents types d'infrastructures de transports, de logements, de composition des trafics...).

b. Liaisons fonctionnelles à retenir

Dans le but d'insérer cet effet du bruit dans le modèle, par l'application de ce type de corrélation doses – réponses, il convient de renseigner les niveaux de bruit auxquels les logements sont soumis. Ici, deux difficultés apparaissent :

- le *Noise Depreciation Index* (NDI) est exprimé en unité de bruit (ou décibel) donc requiert, pour être utilisé, des données fines d'exposition ;
- et, si ces données existent et sont accessibles, alors quel NDI appliquer, au regard des taux fournis par la littérature ainsi que de la non linéarité prévisible de la corrélation dose-réponse ?

Il se trouve que, suite à la loi de lutte contre le bruit (décembre 1992), les DDE ont reçu mission d'opérer un nouveau classement sonore des voiries. A ce jour, les principales agglomérations françaises ont fait l'objet d'un tel classement. Ce dernier distribue dorénavant les principales voiries routières et ferroviaires de l'hexagone en 5 catégories, représentant chacune une plage sonore de 5 dB(A), de Leq 55 à Leq de nuit (22h – 6h) à + de 80 dB(A) de jour (6h-22h). Par ailleurs, les NDI dont la littérature rend compte situent la dépréciation moyenne aux alentours de 0,8 % du prix du logement, avec toutefois une tendance à la hausse sur les 30 dernières années.

Aussi, dans la perspective de la simulation, prendrons-nous appui sur les relations dose de bruit – effet de décote proposées par le Commissariat Général du Plan en 2001. Comme le Tableau 19 l'indique, cette recommandation propose des taux distribués, par souci d'opérationnalité, de 5 dB(A) en 5 dB(A), et reconnaît la non linéarité de ce type d'effet en affectant un taux progressif, qui néanmoins est en moyenne de 0,8 % par dB(A).

Tableau 19. Dépréciations immobilières en fonction des niveaux moyens d'exposition au bruit (Leq 24 h).

Leq de jour en façade en dB(A)	55 à 60	60 à 65	65 à 70	70 à 75	Au-delà de 75
% dépréciation par décibel suppl.	0,4 %	0,8 %	0,9 %	1 %	1,1 %

Source : CGP (2001)

Enfin, pour tenir compte du fait que les données proposées par le classement sonore des voiries sont en fait des modélisations d'émissions selon les informations relatives aux trafics, donc que ces données ne renseignent en rien l'exposition des logements pour lesquels nous appliquons les taux indiqués par le CGP, nous proposons de décaler ces taux vers la gamme supérieur, pour tenir compte de l'atténuation du bruit par la distance des habitations à la voie. Ce qui donne :

Tableau 20. Relations doses de bruit – effets de décotes immobilières pour MobiSim SMA.

Leq de jour en façade en dB(A)	55 à 60	60 à 65	65 à 70	70 à 75	Au-delà de 75
% dépréciation par décibel suppl.	-	0,4 %	0,8 %	0,9 %	1 %

➤ **Les % figurant dans ce dernier tableau représentent donc les liaisons doses-effets qu'il convient d'introduire dans le système multi-agent. Toute application territoriale du modèle requerra de se procurer le classement sonore des voiries de l'espace dont on cherche à simuler les dynamiques, puis à appliquer les relations proposées dans le Tableau 20.**

11.2.3. Les effets sanitaires de la pollution atmosphérique liée aux transports :

La question des *effets sanitaires de la pollution atmosphérique* fait l'objet d'une sensibilité croissante au sein des populations urbaines européennes (cf. Eurobaromètres), par-delà les seules contestations exprimées lors des projets de transports. Les discours associatifs sont de plus en plus structurés autour. Les arbitrages réalisés par les pouvoirs publics, notamment européens, intègrent donc aussi de plus en plus cette problématique (ex : en France, 3 appels d'offre de recherche entre 2003 et 2005). Et, même si ces réactions ont surtout concerné d'autres activités que les transports (ex : dioxine des incinérateurs de déchets), les sources mobiles de pollution suivent. L'exemple du benzène est assez représentatif.

De plus, concernant les comportements des ménages, de récentes publications (in *Environment and Behavior*), ainsi que des travaux en cours dans le cadre du PREDIT (Groupe Environnement) suggèrent un lien de plus en plus visible entre représentations des effets sur la santé de la pollution atmosphérique et critères d'achats de véhicule (achèvement d'une recherche pour le PREDIT dans le courant de l'année 2005). Même si nous rentrons ici dans le domaine de la cognition, ces représentations pourraient donc à terme représenter un facteur de renouvellement différencié du parc automobile, et alors en retour avoir des effets sur les concentrations de polluants et alors la qualité de l'air (boucle de rétroaction).

En tout état de cause, tenir compte de ces effets et des adaptations comportementales des ménages est essentiel pour la prospective.

Pour ce qui concerne ces effets de la pollution atmosphérique sur la santé des populations, les acquis épidémiologiques sont moins exhaustifs et surtout moins consolidés que ceux présentés pour les impacts immobiliers du bruit des transports. Pour la France, ils émanent principalement de travaux réalisés par les observatoires régionaux de la qualité de l'air, au premier chef celui d'Ile-de-France en 1993 (période de mesure 1987-1992) puis en 2003 (période 1987-2000) - (études dites ERPURS - Evaluation des Risques de la Pollution Urbaine pour la Santé)²⁰, ainsi que plus récemment de travaux de recension menés pour le compte de l'Agence Française de Sécurité Sanitaire et Environnementale (AFSSE) à l'échelle française (76 unités d'agglomération en 2004).

Malgré les limites de ces approches pour saisir pleinement des relations doses de polluants – réponses d'affections sanitaires, ces probabilités d'occurrence peuvent représenter un premier moyen de bâtir les

²⁰ Elles sont essentiellement financées par le Conseil Régional d'Ile-de-France, les Ministères de la Santé, de l'Environnement, l'ADEME, EDF-GDF (Service des Etudes Médicales) et le Réseau National de Santé Publique.

liaisons fonctionnelles avec des effets sanitaires. En outre, ces renseignements émanent pour nombre de démarches menées à l'échelle de régions métropolitaines, donc renvoient à des modes de fonctionnement propres à l'échelle spatiale prise en compte pour la modélisation.

Dans l'état actuel des connaissances, et suivant en cela les recommandations de l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS), les résultats produits renseignent sur le risque d'effets sanitaires (déclenchement d'asthme, maladies cardiovasculaires...) ou la probabilité de pratiques médicales (consultations, hospitalisations...) selon les niveaux de concentration dans l'air des grands polluants, notamment d'origine automobile.

En raison des différentes méthodes utilisées, nous prenons ici comme référence, concernant la *mortalité*, l'étude publiée par l'AFSSE en 2004, et pour la *morbidité* les deux études ERPURS (1993, 2003), afin d'indiquer les relations doses – réponses qu'il est convenu, selon l'état des savoirs, de prendre en compte dans MobiSim.

a. Mortalité pour cause de pollution atmosphérique d'origine automobile : liaisons fonctionnelles à retenir de l'étude AFSSE (2004)

Le travail de l'Agence Française de Sécurité Sanitaire et Environnementale (AFSSE) a été centré sur l'impact sanitaire de la pollution atmosphérique urbaine.

L'objectif était double : estimer l'impact de la qualité de l'air sur le risque de *mortalité*, dans la situation actuelle et pour plusieurs scénarii d'évolution de la pollution atmosphérique urbaine ; proposer puis classer des scénarii d'action visant aux horizons 2010 et 2020 à réduire l'exposition de la population en milieu urbain, et ce faisant le risque sanitaire associé (en vue d'aider à la préparation du Plan National Santé Environnement). Nous ne retiendrons pour notre propos que les résultats satisfaisant au premier objectif.

La méthode retenue a été celle d'avis d'experts (INSERM), selon une méthodologie fondée Künzli et al (1999, 2000), appliquée à 76 unités urbaines totalisant 15 259 590 personnes de 30 ans ou plus de la population urbaine française (données INSEE, RGP 1999). Les liaisons fonctionnelles proposées proviennent donc d'avis d'experts concernant la mortalité pour cause de cancer du poumon et pour cause cardio-pulmonaire, mises en relation avec les niveaux de concentration de polluants fournies par l'ADEME (l'exercice de prospective portant quant à lui uniquement sur les teneurs en particules PM_{2,6} en µg/m²), pour les 5 % de jours les plus pollués de l'année. Toute application territoriale du modèle requerra donc en parallèle de se procurer les niveaux de concentration de polluant dans l'air (PRQA – ADEME) de l'agglomération dont on cherche à simuler les dynamiques, puis à recenser le nombre jours de dépassement de seuil autorisé, pour appliquer les relations proposées.

Tableau 21. Résultats synthétiques comparatifs de mortalité pour cause de PA (5 % de jours les plus pollués) ERPURS 1993-2003 et AFSSE 2004. Mortalité totale.

		ERPURS 93 (<i>augmentation en %</i>)		ERPURS 2003	AFSSE 2004(%)
Mortalité totale	fumées noires (FN)	<i>Niv. moyens 24h</i>	4,4 (2,1-6,8)	+4,6%	<i>Pourcentage attribuable : 4,9 (1,7-8,6)</i>
	particules fines en suspension (PS13)	<i>Niv. moyens 24h</i>	5,4 (2,3-8,5)	+4,2%	
	dioxyde de soufre (SO2)	<i>Niv. moyens 24h</i>	4,8 (2,7-6,9)	+3,4%	
		<i>Niv. maxima 1h</i>	5,8 (3,0-8,7)		
	dioxyde d'azote (NO2)	<i>Niv. moyens 24h</i>	-	+4,8%	
		<i>Niv. maxima 1h</i>	2,8 (0,7-5,0)		
Ozone (O3)	<i>Niv. moyens 8h</i>	4,6 (0,5-9,0)	+6,1%		
	<i>Niv. maxima 1h</i>	-			

Tableau 22. Résultats synthétiques comparatifs de mortalité pour cause de PA (5 % de jours les plus pollués) ERPURS 1993-2003 et AFSSE 2004. Mortalité pour causes respiratoires.

Mortalité pour causes respiratoires	ERPURS 93 (<i>augmentation en %</i>)		ERPURS 2003	Cancer du poumon	AFSSE 2004 (%)
	<i>fumées noires (FN)</i>	<i>Niv. moyens 24h</i>	-		+8,6%
<i>particules fines en suspension (PS13)</i>	<i>Niv. moyens 24h</i>	14,5 (3,6-26,6)	+9,3%		
<i>dioxyde de soufre (SO2)</i>	<i>Niv. moyens 24h</i>	-	+8,2%		
	<i>Niv. maxima 1h</i>	9,8 (1,7-18,5)			
<i>dioxyde d'azote (NO2)</i>	<i>Niv. moyens 24h</i>	-	+9,2%		
	<i>Niv. maxima 1h</i>	-			
<i>Ozone (O3)</i>	<i>Niv. moyens 8h</i>	-	+3,1%		
	<i>Niv. maxima 1h</i>	-			

Tableau 23. Résultats synthétiques comparatifs de mortalité pour cause de PA (5 % de jours les plus pollués) ERPURS 1993-2003 et AFSSE 2004. Mortalité pour causes cardiovasculaires.

Mortalité pour causes cardiovasculaires	ERPURS 93 (<i>augmentation en %</i>)		ERPURS 2003	Causes cardio-pulmonaires	AFSSE 2004 (%)
	<i>fumées noires (FN)</i>	<i>Niv. moyens 24h</i>	5,1 (0,3-10,2)		+4,9%
<i>particules fines en suspension (PS13)</i>	<i>Niv. moyens 24h</i>	-	+4,8%		
<i>dioxyde de soufre (SO2)</i>	<i>Niv. moyens 24h</i>	8,4 (3,7-13,3)	+3,5%		
	<i>Niv. maxima 1h</i>	4,2 (0,9-7,6)			
<i>dioxyde d'azote (NO2)</i>	<i>Niv. moyens 24h</i>	-	+5,0%		
	<i>Niv. maxima 1h</i>	-			
<i>Ozone (O3)</i>	<i>Niv. moyens 8h</i>	-	+2,5%		
	<i>Niv. maxima 1h</i>	-			

- Concernant la *mortalité*, les % figurant dans ces 3 derniers tableaux représentent l'ensemble des liaisons doses - effets potentielles pour le système multi-agent. Nous ne retiendrons que celles présentées comme les plus robustes et actualisées :
 - + 4,9 % de mortalité globale ;
 - + 10,7 % de mortalité pour cause de cancer du poumon
 - + 7,2 % de mortalité pour cause cardio-pulmonaire
 - ainsi que les pourcentages étendus et/ou actualisés procurés par ERPURS (1993 et 2003) si l'information de concentration est désagrégée par polluant, et calée sur les seuils légaux d'exposition à la pollution atmosphérique en ville.
- Sur ce dernier point, précisons que travaillant sur les impacts environnementaux des transports, il conviendra surtout d'introduire dans le modèle les % relatifs à des polluants d'origine automobile : particules fines en suspension (PS13), dioxyde d'azote (NO2) et ozone (O3).

b. Morbidité pour cause de pollution atmosphérique d'origine automobile : liaisons fonctionnelles à retenir des études ERPURS 1993 et 2003

Les données de pollution atmosphérique ont été recueillies dans un premier temps auprès du LHVP (Laboratoire d'Hygiène de la Ville de Paris), et fournies par la suite par le réseau AIRPARIF. Les données sanitaires quant à elles se distribuent selon deux types d'indicateurs, mortalité et morbidité. Nous ne nous attarderons ici que sur les données de morbidité.

Ces dernières, ainsi que celles concernant les hospitalisations ont été fournies par la Délégation à l'Information Médicale et à l'Epidémiologie de l'Assistance Publique - Hôpitaux de Paris. Les hospitalisations retenues pour cette étude sont issues des 27 hôpitaux de court séjour situés dans la zone géographique d'étude, c'est-à-dire Paris et la proche couronne. Chaque séjour hospitalier donne lieu à l'enregistrement d'informations anonymes comprenant notamment le diagnostic principal. Afin de rester cohérent avec l'état des connaissances scientifiques actuelles dans le domaine des relations entre la pollution atmosphérique et les admissions hospitalières, seules les affections cardio-vasculaires et respiratoires sont retenues.

Comme le travail de l'AFSSE, l'état de référence ici pris en compte est les 18 jours les plus pollués de l'année (5 %).

Tableau 24. Résultats synthétiques comparatifs d'hospitalisations pour cause respiratoire (5 % de jours les plus pollués) ERPURS 1993-2003.

	ETUDES		Tous âges		0 à 14 ans		15 à 64 ans		65 ans et plus	
			Otarie	PMSI	Otarie	PMSI	Otarie	PMSI	Otarie	PMSI
Dioxyde d'azote (NO2)	ERPURS 1993	Niv. moyens 24h	-		-		+6,3%		-	
		Niv. maxima 1h	-		-		-		-	
	ERPURS 2003		+4,8%	+5,9%	+5,6%	+5,7%	+4,5%	+4,6%	+6,4%	+3,7%
Ozone (O3)	ERPURS 1993	Niv. moyens 8h	-		-		+5,2%		+8,1%	
		Niv. maxima 1h	-		-		-		-	
	ERPURS 2003		+2,3%	+7,3%	+0,1%	+11,2%	+0,5%	+6,8%	+4,8%	+4,1%
Indice de fumées noires (FN)	ERPURS 1993	Niv. moyens 24h	+3,4%		-		-		-	
	ERPURS 2003		+4,2%	+4,6%	+9,1%	+8,0%	+2,9%	+3,0%	+7,0%	+3,6%
Particules fines en suspension (PS13)	ERPURS 1993	Niv. moyens 24h	-		-		-		-	
	ERPURS 2003		+3,3%	-	+9,8%	-	+3,9%	-	+3,0%	-
(PM10)	ERPURS 1993	Niv. moyens 24h	-		-		-		-	
	ERPURS 2003		-	+3,3%	-	+5,7%	-	+3,8%	-	+1,0%
Dioxyde de soufre (SO2)	ERPURS 1993	Niv. moyens 24h	+3,6%		-		-		+7,5%	
		Niv. maxima 1h	-		-		-		+5,7%	
	ERPURS 2003		+3,4%	+4,1%	+13,6%	+13,4%	+3,7%	+3,2%	+6,7%	+3,7%

- Concernant la morbidité respiratoire, les % figurant dans ce tableau représentent l'ensemble des liaisons doses - effets potentielles pour le système multi-agent.
- Nous n'indiquerons ici que les relations fonctionnelles impliquant les polluants liés aux

transports. En outre, nous ne retiendrons que celles présentées comme les plus robustes et actualisées :

- + 5,9 % de *morbidity respiratoire*, tous âges, pour le dioxyde d'azote NO2
- + 7,3 % de *morbidity respiratoire*, tous âges, pour l'ozone (O3)
- + 3,3 % de *morbidity respiratoire*, tous âges, pour les particules fines en suspension (PS13)
- + 3,3 % de *morbidity respiratoire*, tous âges, les particules fines (PM10)

Tableau 25. Résultats synthétiques comparatifs d'hospitalisations pour BPCO (5 % de jours les plus pollués) ERPURS 1993-2003.

	ETUDES		Tous âges		65 ans et plus	
			Otarie	PMSI	Otarie	PMSI
Dioxyde d'azote (NO2)	ERPURS 1993	Niv. moyens 24h	<i>Les analyses réalisées ne mettent pas en évidence de lien significatif entre le risque relatif d'hospitalisations pour BPCO et le niveau de fond de dioxyde d'azote.</i>			
		Niv. maxima 1h				
	ERPURS 2003					
Ozone (O3)	ERPURS 1993	Niv. moyens 8h	+9,8%		+14,5%	
		Niv. maxima 1h	-		-	
	ERPURS 2003		+7,6%	-	+5,1%	-
Indice de fumées noires (FN)	ERPURS 1993	Niv. moyens 24h	<i>Les analyses réalisées ne mettent pas en évidence de lien significatif entre le risque relatif d'hospitalisations pour BPCO et le niveau de fond de fumées noires.</i>			
	ERPURS 2003					
Particules fines en suspension (PS13)	ERPURS 1993	Niv. moyens 24h	<i>Les analyses réalisées ne mettent pas en évidence de lien significatif entre le risque relatif d'hospitalisations pour BPCO et le niveau de fond de particules fines PM13.</i>			
	ERPURS 2003					
Dioxyde de soufre (SO2)	ERPURS 1993	Niv. moyens 24h	+8,6%		-	
		Niv. maxima 1h	+6,7%		-	
	ERPURS 2003		+5,9%	-	+0,7%	-

- Concernant les Broncho-pneumopathies chroniques obstructives (BPCO), les % figurant dans ce tableau représentent l'ensemble des liaisons doses - effets potentielles pour le système multi-agent.
- Nous n'indiquerons ici que les relations fonctionnelles impliquant les polluants liés aux transports. En outre, nous ne retiendrons que celles présentées comme les plus robustes et actualisées :
 - + 7,6 % d'hospitalisation pour cause de BPCO, tous âges, pour l'ozone (O3)
 - la quatrième étude ERPURS, en cours d'achèvement (fin 2005), devrait notamment combler le manque d'informations relatives aux risques BPCO pour cause de particules fines dans l'air.

Tableau 26. Résultats synthétiques comparatifs d'hospitalisations pour cause d'asthme (5 % de jours les plus pollués) ERPURS 1993-2003.

	ETUDES		Tous âges		0 à 14 ans		15 à 64 ans	
			Otarie	PMSI	Otarie	PMSI	Otarie	PMSI
Dioxyde d'azote (NO2)	ERPURS 1993	<i>Niv. moyens 24h</i>	+9,3%		-		+8,7%	
		<i>Niv. maxima 1h</i>	+8,3%		-		-	
	ERPURS 2003			+8,5%	+7,3%	+4,9%	+15,1%	+10,2%
Ozone (O3)	ERPURS 1993	<i>Niv. moyens 8h</i>	-		-		-	
		<i>Niv. maxima 1h</i>	-		-		-	
	ERPURS 2003			-10,4%	-4,9%	-9,7%	+3,1%	-5,9%
Indice de fumées noires (FN)	ERPURS 1993	<i>Niv. moyens 24h</i>	-		-		-	
	ERPURS 2003			+8,8%	+14,9%	+6,4%	+16,0%	+15,9%
Particules fines en suspension (PS13)	ERPURS 1993	<i>Niv. moyens 24h</i>	-		-		-	
	ERPURS 2003			+2,7%	-	+1,3%	-	+9,3%
(PM10)	ERPURS 1993	<i>Niv. moyens 24h</i>	-		-		-	
	ERPURS 2003			-	+9,4%	-	+11,3%	-
Dioxyde de soufre (SO2)	ERPURS 1993	<i>Niv. moyens 24h</i>	+6,0%		+12,3%		-	
		<i>Niv. maxima 1h</i>	-		-		-	
	ERPURS 2003			+2,2%	+9,8%	+1,4%	+18,2%	+10,3%

- Concernant l'asthme, les % figurant dans ce tableau représentent l'ensemble des liaisons doses - effets potentielles pour le système multi-agent.
- Nous n'indiquerons ici que les relations fonctionnelles impliquant les polluants liés aux transports. En outre, nous ne retiendrons que celles présentées comme les plus robustes et actualisées :
 - + 8,5 % d'hospitalisation pour cause d'asthmes, tous âges, pour le dioxyde d'azote NO2
 - + 2,7 % d'hospitalisation pour cause d'asthmes, tous âges, pour les particules fines en suspension (PS13)
 - + 9,4 d'hospitalisation pour cause d'asthmes, tous âges, les particules fines (PM10)

Tableau 27. Résultats synthétiques comparatifs d'hospitalisations pour cause de Mycardiopathies ischémiques (5 % de jours les plus pollués) ERPURS 1993-2003.

	ETUDES		Mycardiopathies ischémiques	
			Otarie	PMSI
Dioxyde d'azote (NO2)	ERPURS 1993	Niv. moyens 24h	+4,6%	
		Niv. maxima 1h	+5,7%	
	ERPURS 2003		+0,8%	+0,2%
Ozone (O3)	ERPURS 1993	Niv. moyens 8h	-	
		Niv. maxima 1h	-	
	ERPURS 2003		+0,2%	+3,0%
Indice de fumées noires (FN)	ERPURS 1993	Niv. moyens 24h	+8,5%	
	ERPURS 2003		+1,5%	+1,0%
Particules fines en suspension (PS13)	ERPURS 1993	Niv. moyens 24h	+6,4%	
	ERPURS 2003		+0,9%	-
(PM10)	ERPURS 1993	Niv. moyens 24h	-	
	ERPURS 2003		-	+0,4%
Dioxyde de soufre (SO2)	ERPURS 1993	Niv. moyens 24h	+9,5%	
		Niv. maxima 1h	+6,6%	
	ERPURS 2003		+4,2%	+0,5%

- Concernant les *Mycardiopathies ischémiques*, les % figurant dans ce tableau représentent l'ensemble des liaisons doses - effets potentielles pour le système multi-agent.
- Nous n'indiquerons ici que les relations fonctionnelles impliquant les polluants liés aux transports. En outre, nous ne retiendrons que celles présentées comme les plus robustes et actualisées :
 - + 0,2 % d'hospitalisation pour cause de Mycardiopathies ischémiques, tous âges, pour le dioxyde d'azote NO2
 - + 3 % d'hospitalisation pour cause de Mycardiopathies ischémiques, tous âges, pour l'ozone (O3)
 - + 0,4 d'hospitalisation pour cause de Mycardiopathies ischémiques, tous âges, les particules fines (PM10)

11.2.4. La gêne imputable au bruit des transports

a. La première nuisance environnementale en milieu urbain

La gêne due au bruit des transports est selon nous le dernier type d'effets qui remplit les conditions fixées initialement : liens statistiques avec les doses initiales connues, effets avérés sur les comportements individuels et préoccupation croissante tant des populations que des pouvoirs publics.

Tout d'abord, plus en phase avec l'idée de bien-être environnemental que ne le sont peut-être les effets sanitaires et surtout les impacts immobiliers, cet autre effet n'en est pas moins, malgré le rôle déterminant joué par la perception et le ressenti humains, déductible de doses d'émissions, ici sonores. Un grand nombre d'enquêtes de psychacoustique (in *Internoise Congress Proceedings 2000-2004, Journal of Acoustical Society of America, Noise and Health, Environmental Health Issues...*) permettent de renseigner les liens statistiques entre les niveaux de bruit et les déclarations de gêne, et ce selon le mode de transport à l'origine des émissions sonores, voire selon le type de circulation et d'infrastructures urbaines. Certains de ces liens ont même été tirés d'enquêtes menées en France (CRETEIL – Université Paris XII, LOUEST – Université Paris X, INRETS – LTE...), ce qui est essentiel compte tenu de la variabilité du ressenti selon les cultures d'appartenance, contextes territoriaux et situations sociales.

En outre, nous sommes sûr que la gêne due au bruit, et au premier chef celle induite par les bruits de transports, constitue un sujet de préoccupation pour les populations. Sans relâche depuis maintenant 20 ans, les sondages d'opinion indiquent que les nuisances sonores dues aux transports constituent la première cause d'insatisfaction environnementale des ménages (cf. par exemple l'Enquête permanente sur les conditions de vie des ménages, INSEE, 2002). L'existence de dépréciations immobilières (cf. 11.2.2.) en est une conséquence directe : les décotes expriment des arbitrages résidentiels sensibles à l'exposition sonore et surtout à sa perception et à la gêne présumée par les ménages. De même, les conflits autour des projets d'infrastructures de transports manifestent le poids de plus en plus important que ce facteur d'environnement et surtout sa représentation dans les contestations individuelles ou associatives. Avec les effets de la pollution atmosphérique sur la santé, nous avons ici deux des objets « effets environnementaux » qui focalisent le plus l'attention des populations dans le cadre des procédures décisionnelles afférentes à ces projets.

Enfin, la sensibilité et la gêne sonores ont incité à certaines réactions des pouvoirs publics. C'est le cas notamment en France des prescriptions d'urbanisme à respecter aux abords des infrastructures classées comme les plus bruyantes, classement sonore de la voirie qui, comme dit plus haut, apporte déjà les données d'entrée servant : à la caractérisation des effets immobiliers du bruit, et alors à l'application du modèle à une agglomération particulière. Ces prescriptions pourraient, notamment parce qu'obligatoirement reportées dans les POS/PLU, avoir des effets sur la mobilité résidentielle des ménages, et alors notamment venir modifier celle singulière rencontrée aux abords de certaines grandes infrastructures.

D'ailleurs, la directive européenne de juin 2002 sur les bruits ambiants impose la production d'une cartographie sonore, notamment pour les agglomérations de plus de 100 000 habitants. Les informations contenues dans ces cartes devront, toujours selon cette directive, être diffusées auprès de tous les habitants, et par les canaux des médias. Cet accès à l'information œuvrera à la mise en débat social de la problématique des nuisances sonores imputables au bruit des transports dans les principales agglomérations françaises.

Nous pourrions alors de nouveau assister à une boucle de rétroaction, en plus de celle produite par la conscientisation des effets sanitaires de la pollution atmosphérique liée aux transports par exemple sur les comportements d'achat de voiture des ménages (via les représentations et croyances relatives à ces effets) ou encore de celle des choix résidentiels des ménages en situation de forte exposition des logements au bruit des transports.

b. Etat des connaissances et liaisons fonctionnelles à retenir

Sans conteste, la gêne sonore répond d'influences psycho-sociologiques. Même si la France ne s'est guère montrée très curieuse de cela, nombre de résultats de travaux de recherche convergent pour indiquer que le seul bruit saisi dans ses dimensions acoustiques n'explique qu'environ 30 % de la gêne déclarée. Bien d'autres facteurs influent, constituant d'ailleurs autant de façons d'envisager réduire les

nuisances sans nécessairement uniquement agir sur le bruit, pour des coûts vraisemblablement moindres (cf. Faburel, Maleyre et Peixoto, 2005 pour une analyse territorialisée de la gêne sonore due au bruit routier ou au bruit ferroviaire).

Toutefois, bien que suffisant nullement à comprendre l'expression de la gêne (déclaration, plaintes, revendications, oppositions...), les niveaux d'intensité sonore entretiennent une relation statistique robuste avec le ressenti de gêne. Cette robustesse permet alors d'envisager, mais de notre point de vue seulement pour des niveaux sonores importants, une certaine prédictibilité des réactions de gêne. C'est ce qu'enseignent plusieurs recensions et méta-analyses scientifiques. Les travaux de J-M. Fields, ou H.M.E. Miedema et C.G.M Oudshoorn sont sans nul doute la référence en la matière. Toutefois, travaillant sur des contextes urbains français, nous compléterons ces informations par celles issues de travaux de recherche menés en France ces dernières années. Ces compléments se justifient d'autant plus que pendant longtemps chaque pays a développé son propre indice de bruit, rendant la prédictibilité de la gêne dépendante de données sonores exprimées selon l'indice acoustique de référence nationale.

Les premières corrélations statistiques et liaisons fonctionnelles qu'il convient d'intégrer pour la simulation des effets de gêne sonore sont celles exprimées en Lden, indice acoustique devenant celui de référence à l'échelle européenne (Directive de juin 2002). Toutes les cartographies sonores évoquées plus haut devront à terme être exprimées selon cet indice qui exprime les niveaux de bruit selon une moyenne journalière (day : Ld) à laquelle des majorations sont adjointes pour les périodes de soirée (evening : e) et de nuit (night : n), considérant qu'une même intensité sonore est plus dérangeante durant ces moments.

Concernant le Lden, nous retiendrons les corrélations proposées par Miedema en 2000, et ne conserverons que celles qui concernent les niveaux sonores les plus élevés, afin de réduire la variance et alors garantir l'imputabilité de la gêne au bruit :

- **Passé LDEN 65 ► 35 % de la population**
- **Passé LDEN 70 ► 47 % de la population**
- **Passé LDEN 75 ► 61 % de la population**

Toutefois, cet indice n'est pas encore définitivement entré dans les pratiques techniques des administrations françaises. Aussi, pour attendre la fin de la transition engagée suite à la directive européenne de juin 2002, passée dans le droit français en 2004, il convient aussi d'intégrer aussi des corrélations dont les doses sonores sont exprimées selon l'indice qui a longtemps, par convention, été celui de référence en France : le Leq (Level Equivalent) 24 heures. Plus frustré que le Lden, le Leq, encore en vigueur selon nombre de textes administratifs, est une simple moyenne des niveaux sonores enregistrés et/ou modélisés sur la période considérée, ici 24 heures (la plus répandue).

A ce stade, nous proposons de retenir les corrélations proposées par l'INRETS (1999), de nouveau pour les niveaux supérieurs de bruit.

- **Passé Leq 60 dB(A) ► 33,4 % de la population**
- **Passé Leq 65 dB(A) ► 54,5 % de la population**
- **Passé Leq 70 dB(A) ► 74,1 % de la population**
- **Passé Leq 75 dB(A) ► 87,2 % de la population**

Pour information, le Tableau 28 donne quelques repères de niveaux sonores exprimés en Leq 24 heures selon les types et volumes de trafics considérés.

Tableau 28. Niveaux moyens de bruit (Leq 24 h) selon les trafics routiers en milieu urbain (CERTU, 1998).

Contextes de circulations	Trafics (véh/h)	Leq dB(A)
Périphérique de Paris	7 000	80
Artère principale d'une grande ville	2000	75
Urbanisation moderne (ex : deuxième couronne francilienne)	2000	70
Rue secondaire d'un centre-ville	500	65
Petite rue calme	200	60
Quartier résidentiel (pour comparaison)		45

Toutefois, comme pour les impacts immobiliers du bruit des transports (11.2.2), la question de la disponibilité des informations sonores se pose. Et, comme pour cet autre effet, nous recommandons ici de prendre appui, pour toute application des liaisons fonctionnelles exprimées en Leq, sur le classement sonore des voiries, mené par les DDE dans le cadre de la loi de lutte contre le bruit de 1992 (cf. 11.2.2.2).

Enfin, comme déjà opéré plus haut, il nous faut tenir compte du fait que les données proposées par le classement sonore des voiries sont en fait des modélisations d'émissions selon les informations relatives aux trafics, donc que ces données ne renseignent en rien l'exposition des populations susceptibles de se déclarer gênées. Aussi, selon le même principe pondérateur appliqué précédemment, nous proposons : de moyenniser ces pourcentages pour les faire correspondre aux gammes de bruit proposées par les classements sonores des voiries, puis de décaler chacun des résultats de liaison vers la gamme supérieure, pour tenir compte de l'atténuation du bruit par la distance des habitations à la voie.

En définitive, concernant les effets potentiels de gêne sonore imputables au bruit routier en milieu urbain exprimé en Leq 24 heures, nous retiendrons pour la modélisation :

- de Leq 60 à Leq 65 dB(A) ► 25,5 % de la population
- de Leq 65 à Leq 70 dB(A) ► 44 % de la population
- de Leq 70 à Leq 75 dB(A) ► 64,4 % de la population
- + de Leq 75 dB(A) ► 80,5 % de la population

11.2.5. La monétarisation des impacts : les coûts environnementaux²¹

Comme indiqué dans le rapport ayant accompagné l'ancienne version de MobiSim, seule l'évolution du modèle vers des dimensions microscopiques devait permettre de potentialiser l'ensemble des informations relatives aux coûts des externalités environnementales des transports en milieu urbain.

Tirés de Boiteux 2001 :

- Effet de serre : 100 Euros / Tonne de Carbone (+3 % / an) => 27 Euros par tonne de Co2
- Pollution atmosphérique : Par zone et type de trafics et non par polluant

Urbain dense = 2,9 Euros/100.veh.km VP ; 28,2 pour PL ; et 24,9 pour Bus.

Urbain diffus = 1 pour VP ; 9,9 pour PL ; 8,7 pour Bus.

²¹ Cette partie sera complétée dans le rapport de recherche à destination de l'ADEME qui développe en particulier les spécificités de la plateforme et l'utilisation de l'objet MobiSim dans les débats publics.

Rase campagne = 0,1 pour VP ; 0,6 pour PL et 0,6 pour Bus

- Bruit : démarche = dépréciations immobilières ; taux de décotes (*supra*) ; base monétaire = valeur locative moyenne nationale au m² = 5,7 Euros
- Effets de coupure (pas de valorisation monétaire du fait des connaissances existantes)

Financement des actions d'environnement pouvant infléchir la relation mobilité transport et localisation des populations et activités :

Outre ce qui sera proposé au titre du financement des systèmes de transports, il serait justifié d'introduire les valeurs tutélaires PA et bruit à appliquer à l'occasion des projets de transports (CGP, 2001). Même si cela n'infléchit pas à ce jour les bilans socio-économiques des projets de transports, d'un point de prospective, l'évocation de plus en plus fréquente de la mise en place du principe pollueur - payeur pourrait à terme conduire les autorités à substantiellement augmenter ces valeurs, indépendamment des intervalles de confiance statistique (ex : Suède ou Norvège).

Toujours au titre des projets d'infrastructures, les conflits qui fleurissent un peu partout à l'occasion de ces projets conduisent de plus en plus à des surcoûts d'investissement pour les autorités, du fait notamment des modifications apportées ces dernières années aux tracés. Le coût global des projets est alors accru. Même si en milieu urbain l'offre foncière ne permet pas de tels projets, ces surcoûts pourraient à terme avoir des conséquences sur le budget alloué aux travaux généralement d'équipement ou d'agrandissement des infrastructures à grand débit présentes dans les tissus des agglomérations. Les contestations infléchissent aussi parfois d'une autre manière les politiques de financement de transports. C'est le cas de TEO à Lyon, ou encore de l'accélération du projet d'élargissement de l'A86 dans le Val-de-Marne. Dans nombre de ces cas, les contestations sont grandement portées par des considérations environnementales.

En outre, concernant plus particulièrement le bruit, et surtout sortant des seuls projets d'infrastructure ou d'équipements, les taxes appliquées aux mouvements aériens vont certainement à termes considérablement augmenter. On sort certes du seul cadre de la mobilité urbaine, mais les montants ainsi dégagés serviront en priorité à l'insonorisation de nombreux logements aux abords des aéroports, aéroports que nous trouvons globalement dans le périmètre des principales agglomérations françaises. Ces financements d'insonorisation pourraient à termes revaloriser un stock non négligeable de logement (ex : 100 000 en IDF). Cela pourrait en outre aussi être supporté sur le budget général de l'Etat (en discussion).

12. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

2002. Comment mesurer l'impact du transport de marchandises en ville ? – le modèle de simulation FRETURB (version 1). LET, DRAST-ADEME ed. 104 pp.

Aguilera-Belanger A, Bloy D, Buisson MA, Cusset JM, Mignot D. 1999. Localisation des activités et mobilité. Laboratoire d'Economie des Transports LET 321 pp.

Banister D, Bleijenberg A, Bonnafous A, Button K, Kågeson P, Quinet E, Rothengatter W, van Vreckem D. 1994. Internaliser les coûts sociaux des transports. OCDE / CEMT. 211 pp.

Barre C, Vanderschelden M. 2004. L'enquête « Etude de l'histoire familiale » de 1999 – Résultats détaillés. INSEE Résultats Société 33 : 44 pp.

Benard R, Jayet H, Rajaonarison D. 1999. L'environnement souhaité par les entreprises. Economie et Statistiques 326-327 : 177-187.

Billot A, Brimicombe A, Frankhauser P, Josselin D, Nicot B, Rolland-May C. 2000. Processus de décision en géo-économie dans un contexte imprécis et incertain. Revue Française de Géo-Economie 13, 1 : 18 p.

Bonnell P. 2004. Prévoir la demande de transport. Presses de l'école nationale des ponts et chaussées 425pp.

Cauret L, Crozet Y, Darbera R, Faudry D, Golovtchenko N, Mirabel F, Nicolas JP, Simon B, Zelem MC. 2001. Automobile et effet de serre. Cahier du CLIP n°12.

Daguet F. 1996. Mariage, Divorce et Union libre. INSEE Première 482 : 4pp.

Debrand T, Taffin C. 2001. La mobilité résidentielle depuis 20 ans : des facteurs structurels aux effets de la conjoncture. Version préliminaire : 27 pp.

Dekneudt J, Jacquot A, Macrakis B. 2003. Projections de ménages pour la France métropolitaine, ses régions et ses départements (Horizon 2030). INSEE Résultats Société 19 : 22pp.

Desesquelles A, Richet-Mastain L. 2004. Bilan démographique 2003 : Stabilité des naissances, augmentation des décès. INSEE Première 948 : 4pp.

Division « Redistribution et Politiques Sociales ». 1999. Le modèle de microsimulation dynamique DESTINIE. INSEE Document de travail 124 pp.

Doherty ST, Miller EJ, Axhausen KW, Gärling T. 2002. A conceptual model of the weekly household activity-travel scheduling process. In Travel behaviour: Patterns, Implication and Modelling, eds Stern E, Salomon I, Bovy P. 192 pp.

Doisneau L. 2003. Bilan démographique 2002 : Légère diminution des naissances. INSEE Première 882 : 4pp.

Doisneau L. 2002. Bilan démographique 2001 : Le regain des naissances et des mariages se confirme. INSEE Première 825 : 4pp.

Dufour JG. 1994. Programme « Transport des marchandises dans la ville ». Une exploitation de l'enquête

« chargeurs » de l'INRETS. Certu 100 pp.

Dumontier F, Guillemot D, Méda D. 2002. L'évolution des temps sociaux au travers des enquêtes Emploi du Temps. *Economie et Statistique* 352-353 : 18pp.

Dupé J. 2004. Six ans d'accession aidée à la propriété en Ille-et-Vilaine [1997-2002] ou le parcours de quelques 17698 ménages représentant 53000 personnes. ADIL 35

Dupé J. 2004. Le marché foncier en Ille-et-Vilaine. L'offre et la commercialisation des terrains à bâtir en lotissement en 2003. Observations et tendances. ADIL 35

Enault C. 2002. Les vitesses dans l'aire urbaine dijonnaise : un modèle fondé sur la fonction logistique et la courbe de congestion routière débit-vitesse. 32 pp.

Flipo A, le Blanc D, Laferrère A. 1999. De l'histoire individuelle à la structure des ménages. INSEE Première 649 : 4pp.

Frankhauser P, Moine A, Bruch H, Tannier C, Josselin D. 1998. Simulating settlement dynamics by modelling subjective attractiveness evaluation of agents. Actes du colloque de la Western Regional Science Association, Monterey/USA.

Galland O. 2000. Entrer dans la vie adulte : des étapes toujours plus tardives mais resserrées. *Economie et Statistique* 337-338 : 13-36.

Gobillon L. 2001. Emploi, logement et mobilité résidentielle. *Economie et Statistiques* 349-350 : 77-98.

Hecquet V, Lainé F. 1999. Structures industrielles locales et formes d'organisation économique. *Economie et Statistiques* 326-327 : 205-223.

Hickman AJ. 1999. Methodology for calculating transport emissions and energy consumption. European Project MEET n° ST-96-SC.204

Houdebine M. 1999. Concentration géographique des activités et spécialisation des départements français. *Economie et Statistiques* 326-327 : 189-204.

Hugrel C, Joumard R. 2004. Transport routier – Parc, usage et émissions des véhicules en France de 1970 à 2025. Rapport LTE. INRETS / ADEME.

Ifen. 2005. 45 indicateurs de développement durable : une contribution de l'Ifen. Editeurs : Lavoux Th, Theys J. *Etudes et travaux* 41 : 144 pp.

Jacquot A. 2002. La demande potentielle de logements. L'impact du vieillissement de la population. INSEE Première 875 : 4pp.

de Kervénoaël P. 2004. Le Parc locatif privé en Ille-et-Vilaine. Vocation locative et structure, approche synthétique des différents parcs. ADIL 35

de Kervénoaël P. 2003. Prévisions météo de l'observatoire de l'ADIL 35 pour la saison locative 2003 au travers de quelques indicateurs. ADIL 35

Laferrère A, Wolff F-C. 2004. Le départ du domicile parental : au-delà des revenus familiaux, l'importance des caractéristiques du logement. 15pp.

- Lautso K, Spiekermann K, Wegener M, Sheppard I, Steadman P, Martino A, Domingo R, Gayda S. 2004. PROPOLIS Planning and Research of Policies for Land Use and Transport for Increasing Urban Sustainability. European Commission 5th PCRD. 368pp.
- Lutinier B. 2002. Les petites entreprises du commerce depuis 30 ans. INSEE Première 831 : 4pp.
- Moeckel R, Schürmann C, Wegener M. 2002. Microsimulation of Urban Land Use. IRPUD
- Morency C. 2004. Contributions à la modélisation totalement désagrégée des interactions entre mobilité urbaine et dynamiques spatiales. Ecole polytechnique de Montréal : 539pp.
- Niel X. 1998. Automobiliste, cycliste, piéton ou le gêneur gêné. INSEE Première 590 : 4pp.
- Niel X. 1998. Pourquoi se passer de voiture ? INSEE Première 607 : 4pp.
- Orfeuil JP. 2000. Stratégies de localisation. Ménages et services dans l'espace urbain. PREDIT La documentation française 75pp.
- Pezzoli F, Frankhauser P. 2001. Arbitrage et Usages, in : Le stationnement résidentiel (sous la direction de J. Frenais), PUCA, 24 pp.
- Rieg C. 2003. Légère diminution des créations d'entreprises depuis 2000. INSEE Première 879 : 4pp.
- Rieg C. 2004. Forte hausse des créations d'entreprises en 2003. INSEE Première 944 : 4pp.
- Rouxel M. 2001. Projections démographiques : des scénarios pour la Bretagne. Octant 87 : 11pp.
- Robert-Bobée I. 2002. Les comportements démographiques dans le modèle de microsimulation DESTINIE. INSEE Document de travail 22 pp.
- Robert-Bobée I. 2003. Calendriers de constitution des familles et âge de fin des études. INSEE Document de travail 82 pp.
- Scherr W, Dupoux F, Morel P. 1999. Prévision multimodale des déplacements par un modèle d'activités ; application au PDU de l'agglomération grenobloise. TEC 156 : 2-11.
- Segalou E. 2000. Modélisation des flux motorisés pour le motif achats. Projet de plateforme commune entre MINOU et FRETURB. ADEUPa de Brest : 13pp.
- Tannier C, Frankhauser P. 2001. From the observations to the construction of an urban dynamics simulation model : an inductive approach. Cybergeo 191 : 18pp.
- Vergeau E, Chabanas N. 1997. Le nombre de groupes d'entreprises a explosé en 15 ans. INSEE Première 553 : 4pp.

LA PLATEFORME MOBISIM SMA

13. IMPLEMENTATION DES SCENARIOS

Un aspect important de la plateforme MobiSim SMA est l'interface d'utilisateur et la méthodologie selon laquelle l'utilisateur peut modifier les scénarios proposés :

- Les scénarios macro-économiques (règles de la projection : évolution du taux de chômage, de l'indice de fécondité, de l'âge moyen de fin d'études ...)
- Les scénarios d'aménagement (politiques à tester : scénarios du SCoT, scénarios originaux, scénarios de rupture)
- Les scénarios « joueur » (possibilités de modifications en cours d'exécution : action sur le Plan d'Occupation du Sol, modification de l'offre de transport, modification des paramètres comportementaux ...).

14. CONCLUSION / PERSPECTIVES

Ce rapport de recherche clôt la phase initiale du processus de modélisation : nous avons pris en compte la problématique de l'interdépendance de la mobilité et de la morphologie urbaines ; identifié le système et le cadre d'étude ; dessiné l'architecture globale du fonctionnement du modèle ; défini la stratégie multi-agent que nous avons ensuite appliqué ; et formalisé les algorithmes de calcul qui régissent le comportement de chacun des agents.

Le développement informatique est désormais en cours : il s'agit d'implémenter les algorithmes décrits dans le présent rapport sur la plateforme de modélisation et de simulation AnyLogic (en utilisant le langage Java). Au cours de cette étape de développement, les algorithmes précédemment définis seront probablement complétés et adaptés en fonction des difficultés rencontrées dans leur mise en œuvre et des lacunes révélées par l'application. Nous tiendrons à jour le rapport de recherche pour tenir compte de cette éventuelle évolution des algorithmes pendant le développement informatique du modèle.

La première application du modèle, à l'aire urbaine de Rennes, sera l'occasion de mettre en place les algorithmes d'initialisation et de paramétrage du modèle. Nous travaillerons en collaboration avec l'AUDIAR et le CETE pour le traitement des données nécessaire à la mise en œuvre du modèle.

Nous procéderons ensuite, sur ce premier exemple, à l'étude du comportement du modèle. Des études de sensibilité pourront être conduites dans le cadre du calage du modèle. Nous garantirons l'indépendance des jeux de données de calage et de validation en procédant à un calage processus par processus avant de valider le modèle sur des données globales.

Une fois les processus de calage et de validation effectués, le modèle pourra être utilisé comme instrument de débat public et outil d'aide à la décision. La création d'une plateforme ergonomique devrait faciliter l'utilisation du modèle par des non-modélisateurs. Le modèle permettra alors de tester différents scénarios du SCoT au regard des indicateurs de performance économique, sociale et environnementale, définis dans le tableau de bord « Mobilité urbaine et développement durable ».

Table des matières

1. PREAMBULE.....	4
1.1. STRUCTURE DU DOCUMENT.....	4
1.2. SYNTHÈSE	5
1.3. ABSTRACT.....	6
LE PROJET MOBISIM SMA	6
2. LE PROJET MOBISIM SMA : INTRODUCTION.....	6
2.1. PROBLÉMATIQUE.....	6
2.1.1. <i>Tendances du développement urbain et de la mobilité dans les villes européennes</i>	6
2.1.2. <i>Interactions entre mobilité et morphologie urbaines</i>	6
2.1.3. <i>Modèles intégrés d'occupation du sol et de système de transport</i>	6
a. Etat de l'art en Amérique	6
b. Modélisation en Europe	6
c. Positionnement du projet MobiSim SMA dans les recherches françaises.....	6
2.2. CONTEXTE.....	6
2.2.1. <i>Historique du projet MobiSim</i>	6
2.2.2. <i>Apport de la modélisation multi-agent</i>	6
2.2.3. <i>Dynamique des systèmes et Systèmes multi-agents</i>	6
2.3. OBJECTIFS OPERATIONNELS DU PROJET MOBISIM SMA	6
2.3.1. <i>Construire un modèle multi-agent intégrant système de transports et urbanisme</i>	6
2.3.2. <i>Produire une plateforme de simulations ergonomique</i>	6
2.3.3. <i>Tester des scénarios établis pour le SCoT</i>	6
LE MODELE MOBISIM SMA	6
3. ARCHITECTURE DU MODELE MOBISIM SMA	6
3.1. SYSTEME D'ETUDE	6
3.1.1. <i>Caractérisation spatiale</i>	6
3.1.2. <i>Echelle et résolution temporelles</i>	6
3.1.3. <i>Finesse de description</i>	6
3.2. STRUCTURE GLOBALE DE LA PLATEFORME ET DU MODELE MOBISIM SMA	6
3.3. VUE D'ENSEMBLE SUR L'ALGORITHME DU MODELE	6
4. REPRESENTATION SPATIALE, AGENTS ESPACE ET MAILLES.....	6
4.1. LES 3 NIVEAUX DE REPRESENTATION DE L'ESPACE GEOGRAPHIQUE	6
4.1.1. <i>L'aire urbaine</i>	6
4.1.2. <i>Les zones statistiques et administratives</i>	6
4.1.3. <i>Les mailles géographiques</i>	6
4.2. LES CARACTERISTIQUES DES ZONES.....	6
4.2.1. <i>Parc immobilier</i>	6
a. Mécanismes.....	6
i. Construction.....	6
ii. Démolition	6
iii. Prix et ajustement des prix	6
b. Parc de logements.....	6
c. Locaux d'entreprises	6
4.2.2. <i>Aménités urbaines</i>	6

4.2.3.	<i>Les Aménités Rurales</i>	6
4.2.4.	<i>Typologie de zone</i>	6
4.2.5.	<i>Mesure de l'accessibilité</i>	6
4.2.6.	<i>L'attractivité de la zone</i>	6
4.3.	LA DYNAMIQUE DE L'OCCUPATION DU SOL.....	6
4.3.1.	<i>Les dynamiques lentes</i>	6
4.3.2.	<i>Prise en compte dans MobiSim SMA</i>	6
a.	Potentiel de déclaration en zone constructible.....	6
b.	L'influence du marché foncier.....	6
c.	La taille des lots (maisons individuelles).....	6
d.	La réserve foncière générée.....	6
e.	Densification et conversion.....	6
f.	Prise en compte des phénomènes de freinage.....	6
g.	L'influence de l'accessibilité.....	6
h.	Le choix de la maille particulière.....	6
5.	AGENTS MENAGES	6
5.1.	VUE D'ENSEMBLE SUR LES BOUCLES DE CALCUL « MENAGES ».....	6
5.2.	INITIALISATION DE LA SIMULATION.....	6
5.3.	LECTURE DES PARAMETRES DE PROJECTION.....	6
5.4.	DEMOGRAPHIE DES MENAGES.....	6
5.4.1.	<i>Décès</i>	6
a.	De l'espérance de vie aux taux de mortalité.....	6
b.	Projection des taux de mortalité.....	6
c.	Impact de l'âge de fin d'études sur les taux de mortalité.....	6
5.4.2.	<i>Ruptures d'unions</i>	6
a.	Divortialité.....	6
b.	Garde des enfants.....	6
5.4.3.	<i>Mise en réserve des candidats pour former un couple</i>	6
a.	Primo-nuptialité.....	6
b.	Remises en couple.....	6
5.4.4.	<i>Mises en couple</i>	6
a.	Tirage aléatoire des rencontres entre candidats à l'union.....	6
b.	Formation des unions.....	6
5.4.5.	<i>Naissances</i>	6
a.	De l'indice de fertilité aux probabilités d'agrandissement de la descendance.....	6
b.	Naissance du premier enfant.....	6
c.	Naissance des enfants de rang supérieur à 1.....	6
5.4.6.	<i>Calcul de l'âge de fin d'études</i>	6
a.	Calcul de l'âge moyen de fin d'études (f) de la génération née l'année a :.....	6
b.	Ecart entre l'âge de fin d'études d'un individu et l'âge de fin d'études moyen de sa génération :.....	6
5.4.7.	<i>Emancipation des enfants</i>	6
5.4.8.	<i>Migrations</i>	6
5.5.	SIMULATION DE L'OCCUPATION PRINCIPALE.....	6
5.5.1.	<i>Transitions entre domicile, école, collège, lycée, études</i>	6
5.5.2.	<i>Entrée dans la vie active des étudiants</i>	6
5.5.3.	<i>Transitions entre l'activité et l'inactivité</i>	6
5.5.4.	<i>Transitions entre l'emploi et le chômage pour les actifs</i>	6
5.5.5.	<i>Mises en préretraite</i>	6
5.5.6.	<i>Départ à la retraite</i>	6
5.5.7.	<i>Calcul des revenus des ménages</i>	6
5.5.8.	<i>Allocations de retour à l'emploi</i>	6
5.6.	SATISFACTION.....	6
5.6.1.	<i>Fonction d'utilité</i>	6
5.6.2.	<i>Gestion du parc automobile</i>	6
5.7.	MOBILITE RESIDENTIELLE.....	6
5.7.1.	<i>Décision</i>	6
5.7.2.	<i>Recherche</i>	6
5.7.3.	<i>Choix et Acceptation</i>	6

6.	AGENTS ENTREPRISES.....	6
6.1.	DEMOGRAPHIE DES ENTREPRISES.....	6
6.1.1.	<i>Etablissements particuliers.....</i>	6
6.1.2.	<i>Commerces.....</i>	6
a.	Evolution de la taille des pôles de quartier.....	6
b.	Evolution du nombre de pôles de quartier.....	6
6.1.3.	<i>Autres emplois.....</i>	6
6.2.	LOCALISATION DES ACTIVITES.....	6
6.2.1.	<i>Etablissements particuliers.....</i>	6
6.2.2.	<i>Commerces.....</i>	6
6.2.3.	<i>Emplois de bureaux.....</i>	6
7.	MARCHE DE L'EMPLOI.....	6
8.	MARCHE IMMOBILIER.....	6
8.1.	LOGEMENTS.....	6
8.2.	LOCAUX D'ENTREPRISES.....	6
9.	AGENTS STATIQUES.....	6
9.1.	OBJECTIFS.....	6
9.1.1.	<i>Quantifier la mobilité, son coût, ses impacts et son évolution.....</i>	6
9.1.2.	<i>Représenter physiquement les infrastructures VP et les réseaux TC.....</i>	6
9.2.	INFRASTRUCTURES VP.....	6
9.2.1.	<i>Représentation.....</i>	6
9.2.2.	<i>Initialisation / Mise à jour.....</i>	6
9.3.	PEAGES ET STATIONNEMENT.....	6
9.3.1.	<i>Différents types de péage.....</i>	6
9.3.2.	<i>Représentation du stationnement.....</i>	6
9.3.3.	<i>Initialisation / Mise à jour.....</i>	6
9.4.	RESEAUX TC.....	6
9.4.1.	<i>Représentation.....</i>	6
9.4.2.	<i>Initialisation / Mise à jour.....</i>	6
9.5.	VERSION SIMPLIFIEE.....	6
10.	MODELISATION DES DEPLACEMENTS QUOTIDIENS.....	6
10.1.	DEPLACEMENTS.....	6
10.1.1.	<i>Intrazones.....</i>	6
a.	Déplacements de proximité.....	6
b.	Déplacements d'accès et à destination.....	6
10.1.2.	<i>Interzones.....</i>	6
10.1.3.	<i>Intermodalité.....</i>	6
10.2.	ALGORITHMES.....	6
10.2.1.	<i>Déplacements de personnes.....</i>	6
10.2.2.	<i>Transport de marchandises.....</i>	6
10.2.3.	<i>Congestion à l'heure de pointe.....</i>	6
10.3.	DEPLACEMENTS DE PERSONNES.....	6
10.3.1.	<i>Génération des activités.....</i>	6
10.3.2.	<i>Génération des déplacements.....</i>	6
10.3.3.	<i>Choix modal.....</i>	6
10.3.4.	<i>Affectation aux réseaux.....</i>	6
10.4.	DEPLACEMENTS : TRANSPORT DE MARCHANDISES.....	6
10.4.1.	<i>Simulation des déplacements liés aux activités des entreprises.....</i>	6
10.4.2.	<i>Gestion du parc automobile Entreprises.....</i>	6
11.	TABLEAU DE BORD « MOBILITE URBAINE ET DEVELOPPEMENT DURABLE ».....	6
11.1.	INDICES DE DEVELOPPEMENT DURABLE.....	6
11.1.1.	<i>Principe / Stratégie.....</i>	6

11.1.2.	<i>Modélisation des impacts environnementaux</i>	6
a.	Emissions	6
i.	Calcul des émissions	6
ii.	Exposition	6
iii.	Effets	6
b.	Consommation	6
c.	Qualité environnementale.....	6
11.1.3.	<i>Modélisation des effets sur la société</i>	6
a.	Santé.....	6
b.	Risques	6
c.	Accessibilité	6
d.	Mixité	6
e.	Equité	6
11.1.4.	<i>Caractérisation de la performance économique</i>	6
a.	Efficacité	6
b.	Coûts	6
c.	Bénéfices	6
11.2.	LA PRISE EN COMPTE DES EFFETS ENVIRONNEMENTAUX DES TRANSPORTS DANS MOBISIM	6
11.2.1.	<i>Justification de prise en compte des effets environnementaux des flux de transport dans une simulation multi-agent des dynamiques métropolitaines</i>	6
11.2.2.	<i>Les impact immobiliers des pollutions et nuisances liées aux transports</i>	6
a.	Etat de la connaissance.....	6
b.	Liaisons fonctionnelles à retenir.....	6
11.2.3.	<i>Les effets sanitaires de la pollution atmosphérique liée aux transports :</i>	6
a.	Mortalité pour cause de pollution atmosphérique d'origine automobile : liaisons fonctionnelles à retenir de l'étude AFSSE (2004).....	6
b.	Morbidité pour cause de pollution atmosphérique d'origine automobile : liaisons fonctionnelles à retenir des études ERPURS 1993 et 2003.....	6
11.2.4.	<i>La gêne imputable au bruit des transports</i>	6
a.	La première nuisance environnementale en milieu urbain	6
b.	Etat des connaissances et liaisons fonctionnelles à retenir	6
11.2.5.	<i>La monétarisation des impacts : les coûts environnementaux</i>	6
12.	REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	6
 LA PLATEFORME MOBISIM SMA		6
13.	IMPLEMENTATION DES SCENARIOS	6
14.	CONCLUSION / PERSPECTIVES	6

Table des Tableaux

Tableau 1. Les différents acteurs de la dynamique d'occupation du sol.....	6
Tableau 2. Actions possibles des différents acteurs.....	6
Tableau 3. Paramètres et variables qui interviennent dans la déclaration de nouvelles zones constructibles.....	6
Tableau 4. Exemple de règles de voisinage pour l'évaluation des transitions non bâti / bâti.....	6
Tableau 5. Coefficients de passage des taux de divorces observés aux taux de ruptures.....	6
Tableau 6. Coefficient multiplicateur appliqué au taux de primo-nuptialité.....	6
Tableau 7. Probabilité d'agrandissement de la famille en fonction du rang du nouvel enfant.....	6
Tableau 8. Répartition des naissances du premier enfant en fonction de la durée d'union.....	6
Tableau 9. Répartition des naissances d'un nouvel enfant en fonction de l'âge du dernier enfant.....	6
Tableau 10. Probabilité de départ du domicile parental non consécutif à une mise en couple.....	6
Tableau 11. Déroulement « normal » de la scolarité d'un enfant.....	6
Tableau 12. Coefficients d'estimation de la probabilité d'être actif en fonction de son statut courant, de son sexe, de son âge et de son âge de fin d'études (ainsi que du nombre d'enfants pour les femmes). (<i>Logit multinomial, DESTINIE</i>).....	6
Tableau 13. coefficients d'estimation de la probabilité de trouver un emploi en fonction de son statut courant, de son sexe, de son âge et de son âge de fin d'études. (<i>Logit multinomial, DESTINIE</i>).....	6
Tableau 14. Paramètres des calculs de salaires (DESTINIE).....	6
Tableau 15. Déroulement de l'algorithme conduisant aux calculs des déplacements de personnes.....	6
Tableau 16. Déroulement de l'algorithme conduisant aux calculs des déplacements générés par le transport de marchandises en ville.....	6
Tableau 17. Résultats de l'application de la Méthode des Prix Hédoniques au bruit routier (1970-2004). 6	6
Tableau 18. Résultats de l'application de la Méthode des Prix Hédoniques au bruit des avions (1960-2004).....	6
Tableau 19. Dépréciations immobilières en fonction des niveaux moyens d'exposition au bruit (Leq 24 h).....	6
Tableau 20. Relations doses de bruit – effets de décotes immobilières pour MobiSim SMA.....	6
Tableau 21. Résultats synthétiques comparatifs de mortalité pour cause de PA (5 % de jours les plus pollués) ERPURS 1993-2003 et AFSSE 2004. Mortalité totale.....	6

Tableau 22. Résultats synthétiques comparatifs de mortalité pour cause de PA (5 % de jours les plus pollués) ERPURS 1993-2003 et AFSSE 2004. Mortalité pour causes respiratoires.	6
Tableau 23. Résultats synthétiques comparatifs de mortalité pour cause de PA (5 % de jours les plus pollués) ERPURS 1993-2003 et AFSSE 2004. Mortalité pour causes cardiovasculaires.	6
Tableau 24. Résultats synthétiques comparatifs d'hospitalisations pour cause respiratoire (5 % de jours les plus pollués) ERPURS 1993-2003.	6
Tableau 25. Résultats synthétiques comparatifs d'hospitalisations pour BPCO (5 % de jours les plus pollués) ERPURS 1993-2003.	6
Tableau 26. Résultats synthétiques comparatifs d'hospitalisations pour cause d'asthme (5 % de jours les plus pollués) ERPURS 1993-2003.	6
Tableau 27. Résultats synthétiques comparatifs d'hospitalisations pour cause de Myocardopathies ischémiques (5 % de jours les plus pollués) ERPURS 1993-2003.	6
Tableau 28. Niveaux moyens de bruit (Leq 24 h) selon les trafics routiers en milieu urbain (CERTU, 1998).	6

Table des Figures

Figure 1. Les rétroactions entre système de transports et localisation (d'après PROPOLIS).....	6
Figure 2. Interactions entre le niveau microscopique (comportement des agents) et le niveau macroscopique (comportement du système).	6
Figure 3. Architecture de la plateforme MobiSim SMA.....	6
Figure 4. Les différentes composantes du modèle MobiSim SMA.....	6
Figure 5. Représentation de l'espace géographique dans MobiSim SMA.....	6
Figure 6. Modélisation de la dynamique de l'offre de logements.....	6
Figure 7. Représentation du parc de logements.....	6
Figure 8. Représentation du parc de locaux d'entreprises.	6
Figure 9. Classification des zones en fonction de la disponibilité d'aménités urbaines et rurales sur leur territoire.	6
Figure 10. Schéma d'interactions entre acteurs locaux sur la dynamique d'occupation du sol.....	6
Figure 11. Emergence de l'action locale à partir des acteurs individuels.	6
Figure 12. Influence du marché foncier sur la déclaration de zones constructibles.....	6
Figure 13. Evolution de la surface des lots en fonction de la distance au centre.....	6
Figure 14. Fonction de type logistique.....	6
Figure 15. Représentation de l'accessibilité.....	6
Figure 16. Exemples de configurations de voisinage.....	6
Figure 17. Illustration d'un scénario fractal.	6
Figure 18. Aménagement fractal volontaire.....	6
Figure 19. Probabilité de divorce en fonction de la durée de mariage.....	6
Figure 20. Taux de primo-nuptialité (gauche : femme ; droite : homme).....	6
Figure 21. Probabilité de remise en couple en fonction de la durée de séparation.....	6
Figure 22. Probabilité de naissance du premier enfant en fonction de la durée d'union.	6
Figure 23. Probabilité de naissance du (n+1)ème enfant en fonction de l'âge de l'enfant de rang n.	6
Figure 24. Evolution de l'âge moyen de fin d'études.....	6

Figure 25. Les phases prises en compte dans le processus de déménagement d'un ménage.....	6
Figure 26. Diagramme d'état des pôles de quartier (commerces de proximité).....	6
Figure 27. Modélisation du marché de l'emploi.	6
Figure 28. Modélisation du marché immobilier.	6
Figure 29. Prise en compte du transport de marchandises (d'après le modèle FRETURB).	6
