

UNIVERSITÉ DE FRANCHE-COMTÉ

ÉCOLE DOCTORALE «LANGUES, ESPACES, TEMPS, SOCIÉTÉS »

Thèse en vue de l'obtention du titre de docteur en

GÉOGRAPHIE

**MODÉLISATION ET SIMULATION MULTI-AGENTS
DE LA DYNAMIQUE URBAINE**

APPLICATION À LA MOBILITÉ RÉSIDENIELLE

Présentée et soutenue publiquement par

Igor AGBOSSOU

Le 28 novembre 2007

Sous la co-direction de :

Pierre FRANKHAUSER, Professeur à l'université de Franche-Comté

et

Christiane WEBER, Directrice de recherche au CNRS, UMR 7011 Image et Ville, Strasbourg

Membres du jury :

Jean-Christophe FOLTETE, Professeur à l'université de Franche-Comté

Pierre FRANKHAUSER, Professeur à l'université de Franche-Comté

Patrice LANGLOIS, Maître de conférences, HDR à l'université de Rouen

Damienne PROVITOLLO, Chargée de recherche au CNRS, UMR 6049 ThéMA, Besançon

Lena SANDERS, Directrice de recherche au CNRS, UMR 8504 Géographie-cités, Paris

Christiane WEBER, Directrice de recherche au CNRS, UMR 7011 Image et Ville, Strasbourg

à Chrisas et Fidèle

Remerciements

Je voudrais commencer par dire un grand merci à mon directeur Pierre Frankhauser, Professeur à l'Université de Franche-Comté, et ma co-directrice Christiane Weber, Directrice de recherche au CNRS, UMR 7011 Image et Ville, Strasbourg, qui, au-delà de m'encadrer, ont su me faire confiance et m'encourager tout au long de ce travail que je n'aurais probablement jamais réalisé sans eux. Tels des parents attentifs ils ont guidé mes pas, depuis ma soutenance de DEA à Strasbourg où j'étais sensé faire ma thèse, à Besançon pour un nouvel espoir. Ils m'ont fait découvrir autrement les joies de la recherche scientifique.

Je tiens à exprimer toute ma gratitude et ma reconnaissance à Damienne Provitolo, Chargée de recherche au CNRS, UMR 6049 ThéMA Besançon pour sa disponibilité et sa spontanéité généreuse à mon égard. Merci pour les précieux conseils !

Mes reconnaissances vont également à Léna Sanders et Patrice Langlois qui ont accepté les fonctions de rapporteur et à Jean-Christophe Foltête pour avoir accepté de juger mon travail en prenant part au jury alors que les sollicitations ne manquaient pas et que leur emploi du temps respectif était déjà bien rempli !

A Hélène Houot et Cécile Tannier pour leurs encouragements et précieux conseils.

A Florence Bailly, Patrice Caro, Edwige Dubos-Paillard, Sophie Carel et Marc Richard pour le soutien et les discussions qui ont permis l'aboutissement de ce travail. Merci également pour le cadre de travail agréable qui m'a été offert tant aux plans matériels et financiers qu'aux plans des relations humaines !

A Aurélie Coig et Armelle Kaufmant pour leur attention et la promptitude avec laquelle elles me répondent chaque fois que j'ai besoin de leurs services.

A Jérôme Valance qui ne ménage pas ses efforts pour "trouver et me fournir" en temps opportuns logiciels et matériels informatiques adéquats à mes besoins.

A Joëlle Depoulon, Michèle Pétigny et Denise Vardanega pour la marque de sympathie qu'elles m'ont toujours témoignée.

A Thierry Brossard, Daniel Joly et Serge Ormaux pour leurs encouragements stimulants.

A toutes les personnes du laboratoire ThéMA ainsi que mes collègues qui sont devenus au cours du temps plus que de simples collègues.

Avant-propos

Les données qui nous ont permis de réaliser des simulations sont issues de l'Enquête-Ménages-Déplacement réalisée par la Communauté d'Agglomération du Grand Besançon (CAGB) dans le cadre d'un partenariat, associant l'INSEE de Franche-Comté et l'Agence d'Urbanisme de l'Agglomération de Besançon (AUDAB). Elles ont été acquises grâce au partenariat qui lie le laboratoire ThéMA UMR 6049 à ces différentes institutions.

Par ailleurs, le prototype de simulation *VisualSimores* (dont les instructions pour l'installation se trouvent dans le fichier "*Lisez-moi*" du CD-ROM d'accompagnement) a été entièrement développé par nos soins en langage C# avec le Framework .NET 2.0 de Microsoft. Il s'agit à l'heure actuelle, d'un outil de recherche non destiné à un public plus large.

[...] une idée essentiellement géographique : celle d'un milieu composite, doué d'une puissance capable de grouper et de maintenir ensemble des êtres hétérogènes en collaboration et corrélation réciproque. Cette notion pourrait être la loi même qui régit la géographie des êtres vivants.

*P. Vidal de la Blache,
Principes de géographie humaine*

Et quoi qu'on en dise, dans la vie scientifique, les problèmes ne se posent pas d'eux-mêmes. C'est précisément ce sens du problème qui donne la marque du véritable esprit scientifique... S'il n'y a pas eu de question, il ne peut y avoir connaissance scientifique. Rien ne va de soi. Rien n'est donné. Tout est construit.

*G. Bachelard,
La formation de l'esprit scientifique*

Sommaire

Introduction.....	13
Partie I : De la mobilité à la modélisation des dynamiques urbaines	19
Chapitre 1. La mobilité : quelle place dans l'analyse des dynamiques socio-spatiales ?.....	21
1.1. La mobilité : une notion transdisciplinaire à dominance spatiale	23
1.2. Retour sur les différentes formes de la mobilité	27
1.3. Mobilité et politiques territoriales	32
1.4. La mobilité comme moteur de la dynamique urbaine	37
Bibliographie référencée	44
Chapitre 2. La mobilité résidentielle : mesure, dynamiques et déterminants....	47
2.1. Mesures et évolution des connaissances sur la mobilité résidentielle	49
2.2. Les dynamiques habitat-habitants	56
2.3. Les déterminants de la mobilité résidentielle	61
Bibliographie référencée	75
Chapitre 3. Problématiques et premières approches de modélisations et de simulations urbaines.....	79
3.1. Problématiques liées à la modélisation des dynamiques urbaines	80
3.2. La ville et son fonctionnement	82
3.3. Approche systémique de la ville	89
3.4. Appréhender la ville comme un système complexe	93
3.5. Des approches classiques de modélisation à la géosimulation urbaine	97
Bibliographie référencée	106
Partie 2 : Appropriation conceptuelle et méthodologique des outils de la géosimulation.....	113
Chapitre 4. L'approche multi-agents en géographie.....	115
4.1. Quelques généralités sur le paradigme multi agents	117
4.2. Le concept d'agent	123
4.3. Système multi agents versus simulation multi agents	127
4.4. Méthodologie orientée agent en géographie	130
4.5. Quelques applications géographiques des SMA	135
Bibliographie référencée	141
Chapitre 5. Les automates cellulaires comme support spatial à la dynamique urbaine.....	143
5.1. Introduction aux automates	144
5.2. Réseaux d'automates et automate cellulaire	145
5.3. Modélisation par automates cellulaires en géographie	147
5.4. Quelques exemples d'applications géographiques des automates cellulaires	155
Bibliographie référencée	164

Partie 3 : Réalisation et application d'un modèle de simulation de la dynamique urbaine : <i>VisualSimores</i>.....	167
Chapitre 6. Modélisation du comportement des agents et de la dynamique résidentielle.....	169
6.1. Considérations théoriques relatives aux réseaux bayésiens	171
6.2. Formalisation du modèle comportemental des agents	178
6.3. Formalisation de la dynamique spatiale de l'habitat	181
6.4. Modèle algorithmique du système résidentiel : couplage SMA-AC	188
Bibliographie référencée	200
Chapitre 7. Résultats de l'application du modèle de simulation.....	203
7.1. Présentation succincte du prototype <i>VisualSimores</i>	204
7.2. Le terrain d'application : la commune de Saône	206
7.3. Description des données de calibrage du modèle de simulation	208
7.4. Analyse des résultats	210
Bibliographie référencée	222
Conclusion.....	223
Bibliographie générale	229

INTRODUCTION

Les villes sont par essence, par définition, faites non pas de clones mais de gens différents, issus de différents milieux sociaux, de différentes professions, de différents âges [...]. Nous avons tous intérêt à maintenir cette diversité, à permettre à tous les milieux sociaux, aux riches, aux pauvres de vivre dans les villes.

J-R. Pitte

Cette recherche s'intéresse à l'étude des choix résidentiels dans le contexte de la périurbanisation. La périurbanisation est un processus d'urbanisation ancrée dans les dynamiques territoriales de nombreux pays, notamment ceux de l'Europe occidentale et aux États-Unis. Elle a débuté dans les années 1940 aux États-Unis et a gagné l'Europe occidentale dans les années 1950-60. Ce phénomène, qui se manifeste par un étalement urbain du centre vers les périphéries, s'est d'abord manifesté dans les grandes villes, avant de se diffuser dans les villes moyennes et petites, sous l'effet notamment d'une motorisation massive et d'une baisse des coûts de transport. En France, le phénomène de périurbanisation est né à la fin des années 1960, période à partir de laquelle la politique de l'habitat s'oriente vers l'accès à la propriété. Les communes périurbaines deviennent ainsi des espaces privilégiés pour accueillir un grand nombre de lotissements pavillonnaires. La périurbanisation étant un objet d'étude vaste et complexe, nous avons focalisé notre recherche sur un axe thématique de ce phénomène, celui de la mobilité. Le système de mobilité accompagne en effet les dynamiques périurbaines et est au centre de forts enjeux actuels en termes d'aménagement du territoire en raison de sa dimension sociale, économique et environnementale. Les phénomènes de mobilité des ménages peuvent être globalement appréhendés à partir de deux échelles, celle de la

mobilité quotidienne d'une part, celle de la mobilité liée au cycle de vie et donc aux trajectoires résidentielles d'autre part.

Dans le cadre de ce travail de thèse, nous avons étudié, modélisé puis simulé, dans un objectif d'aide à la décision en aménagement du territoire, les dynamiques urbaines sous l'angle thématique de la mobilité résidentielle, c'est-à-dire sur le changement de lieu d'habitation. Les questionnements sociaux, politiques et environnementaux relatifs à la mobilité résidentielle sont à l'origine de travaux de recherche appliquée ou fondamentale, travaux qui s'effectuent le plus souvent sous un angle disciplinaire. Dans notre travail de recherche, nous avons souhaité nous affranchir des frontières disciplinaires pour replacer la mobilité résidentielle dans une approche transdisciplinaire. Nous nous sommes ainsi appuyés sur les travaux de nos prédécesseurs en sciences humaines et sociales (la géographie, la sociologie, l'économie, la démographie et la psychologie) afin de cerner les différentes facettes de la mobilité résidentielle, de comprendre les causes et les processus de migration résidentielle, et aussi de décrypter les logiques comportementales des ménages face aux choix résidentiels. Tout acte humain ayant une dimension spatiale, on peut appréhender la complexité liée à la prise en compte du facteur spatial dans les comportements humains : l'espace est support des choix lorsque nous réalisons une activité quelle qu'elle soit, par exemple, il est l'objet de nos choix lorsque nous décidons d'habiter ou de travailler dans un endroit précis. Ainsi, la dimension spatiale présente de multiples facettes et amène les chercheurs en géographie et en aménagement du territoire, qui s'intéressent à la modélisation des problématiques urbaines dans une perspective d'aide à la décision, à combiner plusieurs savoirs et compétences issus d'autres disciplines.

Trois pistes de réflexion ont été abordées afin de modéliser et simuler la mobilité résidentielle.

La première piste de recherche porte sur la prise en compte et la formalisation des **interactions spatiales et a-spatiales entre l'habitat et les habitants**. Il s'agit d'analyser et de décrire les différentes façons dont l'espace peut influencer les comportements des ménages dans le choix de leur résidence et inversement, d'identifier les processus par lesquels les choix résidentiels des ménages engendrent une structuration de l'espace. Cette question amène également à s'intéresser aux influences qu'un ménage pourrait exercer sur le comportement résidentiel d'un autre ménage.

La deuxième piste porte sur **les différents niveaux d'organisation et leur articulation**. On s'intéressera plus particulièrement aux échelles spatiales (quartier, commune, etc.) et fonctionnelles (individu, ménage, groupe d'individus, etc.) de la mobilité.

La troisième piste de réflexion est relative aux dynamiques des mobilités résidentielles et à l'unité temporelle pertinente pour analyser ces dynamiques.

Ces pistes de réflexion amènent à s'appuyer sur des corpus conceptuels, méthodologiques et théoriques à la croisée de plusieurs disciplines

S'intéresser aux choix résidentiels nécessite d'appréhender les décisions pour lesquelles les individus ou les ménages évaluent leurs propres conditions résidentielles et les comparent aux conditions offertes par d'autres lieux de résidence potentiels. Ainsi, dans un premier chapitre, nous menons un débat centré sur la mobilité. L'accent est mis sur les formes de mobilité, les diverses politiques territoriales la concernant puis en quoi la mobilité résidentielle est un élément structurant du territoire. A ce titre, comment la mobilité résidentielle se manifeste-t-elle ? De quelle manière peut-on l'appréhender et la mesurer ? Les réponses à ces interrogations sont apportées dans le deuxième chapitre par le biais d'un exposé transdisciplinaire de l'état de l'art. Dans le troisième chapitre, nous posons la problématique de la modélisation et de la simulation de la dynamique urbaine en gardant la thématique de la mobilité résidentielle comme fil conducteur. La théorie des systèmes et les sciences de la complexité servent de cadre théorique à notre réflexion. Ce cadre permet d'appréhender la complexité des systèmes de villes et de mobilité. Ce chapitre se termine par une introduction à la géosimulation qui pose les jalons conceptuels et méthodologiques nous permettant d'approcher les trois grandes pistes de réflexions énumérées précédemment.

Notre positionnement conceptuel et méthodologique par rapport aux outils de la géosimulation est précisé et détaillé dans la deuxième partie. Les quatrième et cinquième chapitres exposent en détail les choix conceptuels que nous avons effectués ainsi que notre démarche méthodologique. Ainsi, le fait de modéliser et de simuler des phénomènes et des processus spatiaux nous a amené à combiner non seulement des savoirs relatifs à la thématique de recherche, mais également des compétences fournies par divers domaines : des mathématiques à l'informatique en passant par la statistique et la physique. Ces disciplines ouvrent en effet, des perspectives méthodologiques

considérables à la géographie théorique et quantitative* en l'occurrence lorsqu'il s'agit de conduire des travaux scientifiques sur des problématiques d'aménagement du territoire. En effet, l'aménagement du territoire apparaît comme une exigence de "justice spatiale" visant à corriger des disparités à la fois économiques, socio-culturelles, démographiques, etc.

A partir d'un exposé détaillé du paradigme multi-agents, nous montrons en quoi la nature anthropomorphe (le fait de pouvoir formaliser des comportements humains) des agents intentionnels (doté d'une faculté de raisonner) est utile pour modéliser le comportement de localisation résidentielle des ménages. Ainsi, les différents comportements de ménages sont modélisés par des agents cognitifs (des agents qui possèdent une mémoire et capables de se représenter leur environnement) de type BDI (*Believe, Desire, Intention*) dotés de l'ensemble des caractéristiques cognitives et des comportements fonctionnels relatifs à la mobilité résidentielle. La dimension spatiale est modélisée par des agents spatiaux réactifs de type automate cellulaire. Le principe de fonctionnement des automates cellulaires qui dans notre cas, sert de support à la modélisation de la dimension spatiale, a fait l'objet du cinquième chapitre. Nous avons donc opté pour le couplage entre un système multi-agents et un automate cellulaire pour concevoir le modèle et l'outil de simulation de la mobilité résidentielle. Ce couplage est rendu possible grâce à une formalisation axée sur les réseaux bayésiens. Le prototype logiciel du modèle est baptisé *VisualSimores* et peut être installé à partir du CD-ROM qui accompagne la thèse. Les détails techniques (modèle graphique en UML des librairies et la vue statique des classes) se trouvent en annexe 2.

L'objet de la troisième partie de la thèse est de mettre au point notre modèle de simulation de la mobilité résidentielle intra-communale et de tester sa robustesse en l'appliquant à un territoire. Notre choix s'est porté sur la commune de Saône, une commune de la région de Franche-Comté (Est de la France). En effet, la commune de Saône offre l'avantage de fournir les données nécessaires (âge, revenu, statut d'occupation, composition familiale) à la calibration du modèle. Ces données

* "Bien que l'expression de "Géographie Théorique et Quantitative" soit malencontreuse et prête à maints malentendus, c'est un raccourci consacré par l'usage pour désigner des travaux qui partagent un certain cadre de référence conceptuel et méthodologique. Quoique tout aussi flou et englobant, c'est aussi un cadre institutionnel défini par une Commission du Comité National de Géographie, correspondante de la Commission des "Modèles mathématiques" de l'Union Géographique Internationale."
(cf. <http://www.cybergeu.eu/index221.html>).

constituent les déterminants de la mobilité résidentielle intrinsèquement à un ménage. Mais l'environnement résidentiel ou la qualité des aménités offertes par le lieu de résidence influence aussi le choix résidentiel d'un ménage. De plus, cette commune est peu sous l'influence de la polarisation bisontine. Elle possède en effet sa propre dynamique urbaine, ce qui était un atout indéniable pour l'étude de la mobilité intra-communale.

Au sixième chapitre, chaque étape de la modélisation est argumentée. La formalisation probabiliste du modèle comportemental des ménages ainsi que le modèle d'automate cellulaire développé ont été présentés. Nous avons particulièrement insisté sur les aspects mathématiques sous jacents à l'implémentation informatique des agents, des cellules et de la dynamique globale du système résidentiel. Quelques résultats de l'application du modèle de simulation sont consignés dans le dernier chapitre de la thèse. L'ensemble des simulations effectuées sur cette commune est organisé en trois catégories selon trois types de scénarios : "un cadre de vie agréable pour tous et un équilibre sociodémographique", "un cadre de vie de qualité moyenne pour tous et une moins bonne entente dans les familles" et "un cadre de vie agréable pour les propriétaires et de qualité moyenne pour les locataires et une bonne entente dans les familles". Les résultats présentés ont également permis de nous rendre compte des limites du modèle et de commencer à explorer de nouvelles pistes de réflexions pouvant contribuer à quelques améliorations tant de *VisualSimores* que des approches conceptuelles et méthodologiques de la modélisation de la dynamique urbaine dans une perspective d'aide à la décision en aménagement du territoire.

Partie I

DE LA MOBILITÉ À LA MODÉLISATION DES DYNAMIQUES URBAINES

Dans cette partie,

Chapitre 1 : La mobilité : quelle place dans l'analyse des dynamiques socio-spatiales ?

Chapitre 2 : La mobilité résidentielle : mesure, dynamiques et déterminants

Chapitre 3 : Problématiques et premières approches de modélisations et de simulations urbaines

1

LA MOBILITÉ : QUELLE PLACE DANS L'ANALYSE DES DYNAMIQUES SOCIO-SPATIALES ?

Prendre possession de l'espace est le geste premier des vivants, des hommes et de bêtes, des plantes et des nuages, manifestation fondamentale d'équilibre et de durée.

Charles-Édouard Jeanneret-Gris

alias

Le Corbusier

Les expériences de mobilité engendrent, de plus en plus, de profonds bouleversements en termes de réactivité aussi bien dans le monde de la recherche scientifique que dans la pratique de l'urbanisme. La prise de conscience d'une augmentation tant quantitative que qualitative des déplacements dans la ville oblige à repenser la façon dont on les analyse et dont on gère la ville. L'évolution des espaces métropolitains à travers le monde se traduit par une transformation des modes de vie et des pratiques de mobilité. Valorisée sur le plan économique au titre de vecteur de croissance, stimulée par la diffusion de systèmes techniques offrant des potentiels de vitesse considérables, la mobilité des personnes connaît une croissance continue depuis plusieurs décennies. La croissance des volumes de flux, de leur vitesse et de leur portée spatiale suscite beaucoup d'interrogations. Ces questionnements relatifs aux effets de la mobilité sur le devenir des territoires et des structures sociales font en réalité suite aux nombreuses évolutions qu'a connues le phénomène de mobilité spatiale.

Mais en tant que géographe sensible aux problématiques d'aménagements urbains, le chercheur est plus enclin à s'orienter vers l'étude des mobilités urbaines [Certu, 2002 ; Marzloff, 2005 ; Wachter et *al.*, 2005] qui se démarquent nettement des autres formes de mobilités spatiales par le fait que le déplacement se fait en direction d'un bassin de vie autre que celui d'origine. Ce faisant, il est plus à même à analyser et interpréter les dynamiques des structures sociales et des formes spatiales qui en émergent.

1.1. La mobilité : une notion transdisciplinaire à dominance spatiale

Le dictionnaire Petit Larousse (Édition 2001) définit la mobilité comme "*[la] facilité à se mouvoir, à changer, à se déplacer*", soit une aptitude qui renvoie à un potentiel (ce qu'il est possible de faire, que cette possibilité se concrétise ou non). La mobilité fait donc partie des notions les plus partagées au sein des sciences sociales, à commencer par les disciplines telles que la géographie, la sociologie, la démographie, l'aménagement et l'urbanisme, au point de devenir une question de société [Lassave et Haumont, 2001]. Mais que faut-il entendre par ce terme et comment se matérialise-t-il ?

1.1.1. Le caractère polysémique de la notion de mobilité

L'étude des migrations est au confluent de plusieurs disciplines. Géographes, démographes, économistes, sociologues, statisticiens et mêmes historiens et linguistes s'attachent à examiner et expliquer les phénomènes migratoires. Plusieurs disciplines ont donc produit des analyses différentes et complémentaires sur les mobilités. Même si ces travaux ont permis un progrès considérable des connaissances en la matière, les problématiques ne se traitent pas de la même façon en raison de la nature polysémique du concept de mobilité. En effet, les termes de mobilité géographique, migration, mobilités spatiale et quotidienne sont employés indifféremment pour désigner un changement plus ou moins durable de lieu [Bonvalet et Brun, 2000]. Pourtant, des différences existent dans leur définition et leur utilisation. Le concept de migration désigne souvent de manière plus ou moins explicite des déplacements internationaux ou interrégionaux. Le concept de mobilité géographique comprend généralement ces mouvements, mais également les mouvements à l'intérieur d'une agglomération. Mais ces deux concepts ne rendent pas compte des mouvements pendulaires [Girerd, 2004], ni des divers autres types de déplacements liés aux services, aux loisirs, etc. La mobilité spatiale quant à elle, se définit comme l'ensemble des déplacements des acteurs (individuels ou collectifs) dans l'espace physique (ou géographique), quels que soient la durée et la distance du déplacement, les moyens utilisés, les causes et les conséquences [Bassand et Brulhardt, 1980].

Aussi, lorsqu'un géographe évoque le terme mobilité, il ne parle pas forcément de la même chose qu'un ingénieur ou un sociologue qui utilise cette notion ; ce qui peut rendre difficile le dialogue en ce qui concerne leurs savoirs respectifs. Au stade où en est l'état

de l'art, croiser les littératures est devenu une nécessité pour progresser. C'est potentiellement une source d'enrichissement considérable, les différentes acceptions de la mobilité formatent ainsi la recherche. Chaque définition relative à un aspect de la mobilité spatiale renvoie alors à un champ de recherche spécifique traitant d'un objet spécifique. Il résulte de cette situation qu'il n'est pas aisé de traiter d'objets de recherche transversaux échappant à ces définitions. Même si chacune de ces formes de mobilité fait l'objet d'une littérature abondante, on a parfois l'impression de "piétiner" car la plupart des recherches sur la mobilité sont orientées sur des thématiques sectorielles. Or, c'est par le biais des articulations entre les différentes formes de mobilité et les arbitrages effectués par les acteurs que se révèlent pleinement les phénomènes de mobilité et leurs enjeux. L'analyse des processus de croissance de la connexité des formes de mobilité et de leur réversibilité [Kaufmann et *al.*, 2004], illustre l'importance de ces articulations car ils renvoient précisément à la combinaison des différentes formes de mobilité en termes de renforcement, de substitution ou de rythmes.

1.1.2. De la contiguïté à la connexité spatiale de la mobilité

Les notions de contiguïté et de connexité relèvent du vocabulaire de la géographie et se réfèrent à la spatialisation de la mise en relation des lieux. La connexité peut se définir comme la mise en relation par l'intermédiaire des systèmes techniques de transport et de communication ; et, la contiguïté comme la mise en relation par la proximité spatiale. En réalité, les nouveaux moyens de télécommunication et les transports rapides ont permis à la connexité de se développer et les acteurs s'insèrent désormais à plusieurs échelles spatiales [Offner et Pumain, 1998]. La croissance de la connexité a fortement retenu l'attention des chercheurs en sciences humaines, et notamment des géographes. Il ressort de ces travaux trois aspects.

D'abord « l'archipelisation » du territoire : les espaces vécus se caractérisent de plus en plus par une dilution territoriale et des discontinuités dans l'espace. Ce phénomène concerne la mobilité quotidienne avec l'éloignement croissant entre les lieux de travail et les lieux de résidence. Mais il concerne également les autres formes de mobilité, et notamment les résidences secondaires de week-end ou la bi-résidentialité. Dans tous ces cas, la connexité conduit à développer une forme d'ubiquité dans l'insertion sociale, ubiquité consistant à avoir plusieurs vies en parallèles dans des lieux spatialement éloignés [Kaufmann et *al.*, 2004, *op. cit.*].

Ensuite, la croissance de la connexité correspond à une dépendance graduelle des moyens de transport : il est de moins en moins possible de s'insérer socialement sans avoir accès aux potentiels de vitesse offerts par les moyens de transports motorisés. De plus, l'ancrage de la pratique des moyens de transport dans les modes de vie fait que ceux-ci sont de moins en moins interchangeables, car chaque moyen de transport définit des opportunités spécifiques de combinaison d'activités dans l'espace et dans le temps. Ainsi, par exemple, l'usage des transports publics multiplie généralement des opportunités de s'approprier les centres-villes pour des micro-activités, car l'offre de transports collectifs est souvent de structure radiale. A l'inverse, l'usage de l'automobile produit souvent des opportunités d'appropriation des équipements commerciaux d'entrée de ville, l'accessibilité routière de ces derniers étant presque toujours excellente.

Enfin, on peut noter que la connexité matérialise le passage d'un modèle de différenciation socio-spatiale aréolaire à un modèle fragmenté : jusque dans les années 1960, nos sociétés occidentales étaient marquées par la séparation des fonctions dans l'espace social (division sexuelle du travail, primat de la catégorie socioprofessionnelle dans l'identité) et spatial (spécialisation fonctionnelle du sol). Changer de rôle impliquait généralement de changer de lieu [Schuler et *al.*, 1997]. Ce modèle s'est maintenant estompé pour laisser place à une superposition spatiale et temporelle accrue des rôles. L'effacement progressif de la répartition des tâches (travail féminin, père au foyer, etc.) et le développement du temps libre multiplient les mobilités sociales horizontales sans qu'il y ait forcément d'autres mobilités spatiales qui leur soient associées. Ainsi, par exemple, le logement est-il désormais non seulement investi comme espace domestique et familial, mais de plus en plus souvent comme espace de loisir (vidéo, TV, Internet) ou comme lieu de travail (grâce notamment à l'ordinateur relié à Internet pour le télétravail).

1.1.3. De l'irréversibilité à la réversibilité de la mobilité

Les notions de réversibilité et d'irréversibilité sont empruntées à l'astrophysique et ne sont que récemment entrées dans le langage des sciences humaines [Bellanger et Marzloff, 1996]. Elles se réfèrent au temps ou plus précisément à la possibilité ou non de revenir à un état antérieur. Ces deux notions sont définies en référence à l'impact de la mobilité sur l'identité des acteurs [Schuler et *al.*, 1997, *op. cit.*]. En sociologie, l'irréversibilité est une expérience sociale totale. C'est-à-dire qu'elle a forcément un effet sur l'individu. A l'opposé, la réversibilité est une expérience sociale que l'on peut

annuler. Les mobilités les plus réversibles sont toutes celles dont on ne se souvient pas précisément. Souvent répétitives, elles relèvent de l'univers du non événementiel. La pendularité et le voyage d'affaire en sont de bons exemples : un actif va travailler tous les jours, mais il ne se souvient pas précisément de chaque trajet quotidien, un consultant international va beaucoup voyager mais ne se souvient pas précisément de chaque fois où il a pris l'avion ou le volant. Il ne faut pas déduire de cette absence de souvenir précis que les mobilités les plus réversibles sont sans impacts sur l'identité. Leur caractère répétitif les rend souvent structurantes de l'identité, pour soi, et par le regard d'autrui. Par contre, le jour où ces expériences sociales cessent, elles ne laissent pas de trace dans l'identité, au contraire des mobilités irréversibles. Comme l'opposition "contiguïté-connexité", réversibilité et irréversibilité doivent être considérées comme des idéaux-types dans la mesure où les formes de mobilité ne sont jamais purement réversibles ou irréversibles. Le processus de réversibilisation de la mobilité spatiale a retenu l'attention des chercheurs [Cwerner, 1999 ; Urry, 1990 ; Urry, 2000], même si elle a fait l'objet de moins de travaux que la croissance de la connexité. De ces travaux, il ressort également trois phénomènes non négligeables dans l'analyse des structures socio-spatiales.

D'abord, un phénomène de substitution des formes les plus irréversibles de mobilité (migration, mobilité résidentielle) vers des formes plus réversibles (mobilité quotidienne, voyage). C'est par exemple le cas de l'usage des potentiels de vitesse procurés par les autoroutes pour vivre loin de son lieu de travail et éviter de déménager [Wiel, 1999 ; Putnam, 2000]. Cette substitution implique la transformation des temporalités du long terme vers le court terme. Surtout, elle correspond à une modification de l'impact de la mobilité sur l'identité. En voyageant plutôt qu'en migrant, en pendulant plutôt qu'en déménageant, on préserve son identité d'origine et l'ensemble de ses réseaux sociaux, car ces formes de mobilités impliquent des retours très fréquents. En fait, cela préserve l'acteur de tout un travail de repositionnement identitaire et de reconstruction qu'impose une migration ou un déménagement. L'une des recherches de Colin Pooley et Jean Turnbull sur l'histoire de la mobilité en Grande Bretagne [Pooley et Turnbull, 1998] illustre la réversibilisation par substitution d'une forme à l'autre en y ajoutant le recul de l'analyse historique. Les données recueillies montrent en particulier une substitution entre les migrations et la mobilité résidentielle, substitution perceptible depuis 1880 et qui s'est accentuée à partir de 1920. Il apparaît en effet que cette forme de substitution est un processus qui naît avec les moyens de transports motorisés et se développe parallèlement à leur essor.

Relevons ensuite une réversibilisation des différentes formes de mobilité elles-mêmes. Davantage que par le passé, il est possible d'annuler les impacts de la distance. Par exemple, des immigrants peuvent rester en contact avec leur famille ou leurs amis par l'intermédiaire du téléphone ou de la messagerie électronique [Cwerner, 1999 ; Stalker, 2000 ; Stimson et Minnery, 1998]. Ainsi, migrer n'implique plus une coupure nette, d'autant plus que les moyens de transports rapides permettent facilement de rendre visite au migrant ou à ce dernier de voyager. La mobilité résidentielle s'accompagne de plus en plus souvent d'habitudes gardées dans l'ancien quartier, comme l'a montré la recherche de Marc Wiel et de Yann Rollier sur la pérégrination dans l'agglomération brestoise [Wiel et Rollier, 1993]. Un autre exemple est celui du regard du touriste, qui universalise les lieux et ce faisant, réduit la possibilité de se confronter à l'inconnu [Urry, 1990, *op. cit.*]. Par ce biais, le voyage se réversibilise, car les sites visités sont de plus en plus des produits standardisés que l'on connaît déjà avant de les avoir vus.

Enfin une croissance des formes de mobilité les plus réversibles en termes de distance les rend plus réversibles encore. Si cette tendance est constante depuis les années 1950 pour la mobilité quotidienne [Salomon et *al.*, 1993], notons qu'on la retrouve pour le tourisme, avec d'une part la croissance du tourisme international, et d'autre part le développement du tourisme urbain de courte durée [Potier, 1996]. C'est ainsi par exemple qu'entre 1970 et 1993, on passe dans les pays de la Communauté Européenne de 2000 à 4000 milliards de personnes/km par an, l'essentiel étant assuré en automobile¹. Elle traduit une constante accélération des vitesses de déplacement. Ajoutons que l'évolution des pratiques modales accentue ce processus. L'automobile est de plus en plus souvent utilisée pour se déplacer au quotidien et l'utilisation de l'automobile permet au conducteur et aux passagers d'être invisibles [Whitelegg, 1997]. Dans ce sens, l'automobile est un moyen de transport plus réversible que ses alternatives.

1.2. Retour sur les différentes formes de la mobilité

Traditionnellement, quatre acceptions différentes du terme de mobilité sont utilisées en sciences humaines pour décrire des mouvements dans l'espace géographique : il s'agit de la mobilité résidentielle (faisant référence au parcours résidentiel), des migrations (en référence aux mouvements internationaux et inter-régionaux d'émigration et

¹ Tiré du rapport de la Communauté européenne "Un réseau pour les citoyens", Bruxelles, 1995

d'immigration), des voyages (en référence au tourisme) et de la mobilité quotidienne (en référence aux déplacements de la vie quotidienne).

1.2.1. Une présentation synoptique des différentes formes de mobilité

On peut classifier les quatre formes de mobilité selon deux dimensions (Figure 1.1) : la temporalité de laquelle elle relève (temporalité longue, temporalité courte) et l'espace dans lequel elle se déroule (espace interne ou externe au bassin de vie). Chacune de ces formes de mobilité fait l'objet d'une littérature abondante et d'un ancrage disciplinaire spécifique [Allemand et *al.*, 2004 ; Andrieux, 1989 ; Aubry, 1988 ; Courgeau, 1988 ; Bonvalet et Brun, 2002 ; Foltête et *al.*, 2002 ; Kaufmann, 2000 ; Lelièvre et Lévy-Vroelant, 1992 ; Moine, 1995 ; Saint-Julien, 2001 ; Sanders, 1990 ; Taffin, 1987 ; Thumerelle, 1986 ; etc.]. Si la mobilité quotidienne a été abondamment étudiée par les géographes, l'analyse de la mobilité résidentielle a souvent été l'apanage des démographes, l'anthropologie s'est approprié le voyage, les migrations restant traditionnellement du champ relevant plutôt de la sociologie.

	Temporalité courte	Temporalité longue
Interne à un même bassin de vie	Mobilité quotidienne	Mobilité résidentielle
Vers l'extérieur d'un bassin de vie	Voyage	Migration

Figure 1.1 : *Les quatre principales formes de mobilité*

Avec la diffusion des technologies de l'information et de la communication, la pratique de chacune de ces mobilités change au point que celles-ci se brouillent [Kaufmann et *al.*, 2004, *op. cit.*] pour des raisons de combinaisons non triviales. Les distances et les vitesses croissent, tandis que les temporalités auxquelles elles renvoient se désynchronisent [Audard, 2006] pour se re-synchroniser selon de nouvelles modalités. C'est ainsi que de nouvelles formes de mobilité viennent s'intercaler entre les quatre susmentionnées. Nous pouvons illustrer ces nouvelles formes de mobilité par les exemples qui suivent.

- La bi-résidentialité (entre mobilité quotidienne et migration inter-régionale ou mobilité résidentielle). Si le double domicile saisonnier existe depuis longtemps, son développement à l'échelle de la semaine est plutôt récent. Il recouvre des situations très différentes. Parmi les couples bi-actifs par exemple, il est souvent le résultat d'arbitrages familiaux lorsque les activités professionnelles des conjoints ne sont pas localisées dans la même agglomération [Lévy, 2000]. On trouve également des

pratiques de double domicile avec les résidences secondaires habitées trois jours par semaine [Viard, 1995]. La garde alternée d'enfants après un divorce est un autre exemple de double domicile en développement [De Singly, 2000].

- Lorsque le lieu de travail est très éloigné du domicile, une autre pratique du double domicile qui se développe actuellement : la pendularité de très longue distance associée au travail à domicile (entre la mobilité quotidienne, la mobilité résidentielle et le voyage). Elle consiste à se déplacer sur son lieu de travail un ou deux jours par semaine et à travailler le reste du temps à son domicile [Hochschild, 1997]. Cette pratique s'appuie largement sur les possibilités de travailler à distance procurées par le développement du réseau Internet.
- Le ménage séparé (entre la mobilité quotidienne et la migration inter-régionale). On assiste actuellement au développement du ménage séparé parmi les couples sans enfant à charge. Ces couples choisissent de ne pas partager le même toit et de se retrouver pour partager soirées, week-ends et vacances [De Singly, 2000].
- Le tourisme de courte durée (entre la mobilité quotidienne et le voyage). Les mobilités de loisir entre les vacances et le week-end connaissent un développement considérable depuis une décennie [Potier, 1996]. Elles prennent souvent la forme de la découverte d'une ville et de ses richesses culturelles sur le mode de la détente.

Malgré la multiplicité des formes de mobilité, celles quotidienne et résidentielle permettent aux géographes de mieux appréhender les dynamiques socio-spatiales qui structurent l'espace géographique à une échelle microscopique et/ou mesoscopique.

1.2.2. La mobilité quotidienne

Il s'agit d'un domaine où les pouvoirs publics restent très présents et pas seulement avec un rôle de régulateur, mais parce que le champ de la mobilité quotidienne concentre les problèmes relevant du politique (accessibilité pour tous, congestion, environnement, etc.). De plus, la production d'informations statistiques appropriables par la recherche y est notable et des équipes de recherche et organismes structurés (Inrets, Let, Creteil, Certu,

etc.) y apportent des expertises non négligeables. La tradition² dominante en France vise à la compréhension des phénomènes et de leurs dynamiques, tandis que la tradition américaine est plus orientée vers des modèles à fort contenu mathématique. Comme dans d'autres domaines, cohabitent des approches de nature microsociale, des approches à l'échelle des groupes sociaux et des approches plus globales, à l'échelle de l'ensemble d'un espace par exemple. Sur le plan de la compréhension des dynamiques de la mobilité, il est indiscutable que des progrès³ importants, c'est à dire amenant à changer de regard sur la mobilité, ont été accomplis dans la recherche, et que ces progrès ont été assez largement diffusés en dehors du monde de la recherche. Ce nouveau regard repose sur la construction d'indicateurs pertinents, leur mise en relation dans un ensemble de "faits stylisés" (pour reprendre une expression à Lena Sanders). L'identification de constantes et de moteurs des transformations et la construction de modèles conceptuels se trouvent également être compatibles avec les observations depuis un quart de siècle. Les variables motrices principales sont la vitesse praticable au cours de la journée (dans les pays développés où l'accès à la motorisation de la majorité est un acquis) et le niveau de vie (dans les pays où celui-ci reste un moteur fort de l'accès à la motorisation et à la mobilité autonome). Les formes de l'urbanisation, hier considérées comme exogènes, sont endogénéisées. L'observation d'une stabilité approximative du budget-temps de transport conduit à une représentation simple de la coproduction de l'urbanisation par l'aptitude à la mobilité et une coproduction de la mobilité par l'urbanisation. Cette représentation inverse en quelque sorte le statut de la mobilité : elle passe du statut de variable « à expliquer » au statut de variable organisatrice. Ce faisant, cette façon de représenter les choses permet ainsi de comprendre à la fois la puissance des transitions modales et les phénomènes d'extension urbaine, mais laisse beaucoup de degrés de liberté quant à l'analyse des acteurs des transformations et à leurs stratégies.

² La « tradition » d'étude de la mobilité démarre en France au milieu des années soixante-dix. Auparavant la génération de déplacements était abordée par les ingénieurs de trafic. Le terme a été importé de la mobilité résidentielle, les orientations des recherches doivent beaucoup à des échanges avec des étrangers, notamment M. Webber, T. Hägerstrand et Y. Zahavi.

³ L'ouvrage "L'automobile et la mobilité des Français", (La Documentation Française, 1980) qui dressait un état de l'art au début des années quatre-vingt et un second ouvrage "Mobilités : le temps des controverses" (Cahiers du Conseil général des Ponts et Chaussées n°7, janvier 2003) en sont une preuve. Une présentation de ces progrès se trouve dans "L'évolution de la mobilité quotidienne. Comprendre les dynamiques, éclairer les controverses" [Orfeuill, 2000], Inrets.

1.2.3. La mobilité résidentielle

Nous reprenons ici le travail de synthèse réalisé par Catherine Bonvalet et Jacques Brun⁴. Les changements durables de lieu (implicitement de résidence) ont longtemps été appréhendés en France à travers le seul rapport entre le lieu de résidence aux dates de recensement et le lieu de naissance. Les recensements ont évolué, de grandes enquêtes quantitatives (enquête logement notamment) sont apparues, des enquêtes ad-hoc ont été construites autour d'objets particuliers (par exemple enquêtes biographiques) et la connaissance des phénomènes s'est enrichie. Diverses disciplines sont mobilisées mais, sur tel ou tel aspect de la mobilité résidentielle, l'une est la plupart du temps dominante. Les grandes évolutions de la mobilité résidentielle sur les quarante dernières années sont connues, notamment en ce qui concerne la fréquence de l'activité et les différences de comportement selon les caractéristiques des individus, ménages et types de parc des logements concernés. Les analyses sur données transversales (étude des structures à un moment donné) se sont déployées dans quatre directions principales.

- Les analyses à dominante économétrique, qui rendent compte des choix de migration, de localisation et de statut d'occupation à un moment donné, et abordent la question de la formation du prix du logement (théorie hédonique).
- L'analyse de l'influence des événements familiaux (arrivées d'enfants, divorces, décohabitation des jeunes, passage à la retraite, etc.) qui jouent surtout sur la mobilité à courte distance et des événements professionnels qui jouent surtout sur la mobilité à longue distance.
- L'appréhension de la mobilité à partir de l'évolution de la structure du parc et de ses occupants, avec en toile de fond politique, des questions de division sociale de l'espace, de ségrégation, de déshérence de certains espaces, en toile de fond technique la dimension de la chaîne de vacances successives induite par une mobilité et sa répartition spatiale.
- L'étude des choix entre individuel et collectif, entre propriété et location, choix du quartier, rapportés à des logiques sociales d'acteurs.

Au-delà des objets étudiés, il y a une parenté évidente entre ces analyses et celles de la mobilité quotidienne : mobilisation de disciplines variées sur un même objet, rapport

⁴ État des lieux des recherches sur la mobilité résidentielle en France in *L'accès à la ville, les mobilités spatiales en questions*, L'Harmattan, 2002

assez étroit entre construction théorique et besoins d'observations empiriques, apports réciproques des approches micro-sociales et des approches plus macroscopiques, etc. Parce que la mobilité résidentielle reste rare et que le logement est une caractéristique essentielle d'une période de vie, les travaux ont aussi pu porter sur des approches longitudinales et des reconstructions "d'histoires de vie", mêlant les parcours résidentiel, familiaux et professionnels, ce qui ne peut se pratiquer dans le champ de la mobilité quotidienne qu'à l'aide de pseudo-panels. Sont notamment mis en évidence les liens complexes entre mobilité résidentielle à longue portée d'une part, trajectoires professionnelles, mobilité sociale des femmes par le mariage, fécondité des couples et anticipation de cette fécondité à travers les caractéristiques des logements occupés par exemple. L'étude des trajectoires résidentielles permet en outre d'incorporer l'influence des habitudes accumulées sur la nature des arbitrages à un moment donné [Courgeau, 1988, *op. cit.*].

1.3. Mobilité et politiques territoriales

De nombreux acteurs s'interrogent sur le devenir des territoires. Certains proposent d'aborder les problématiques territoriales à travers le prisme de la mobilité. Par exemple, J-M et B. Benoît proposent pour leur ouvrage le titre "*Comment la nouvelle mobilité des français va transformer leurs territoires de vie ?*". Plus précisément, les spécialistes de la mobilité réunis à Marlay-le-Roi les 6 et 7 mai 1999 s'accordent à penser que les réflexions sur la mobilité doivent s'effectuer dans un cadre territorial prononcé. D'ailleurs si les rencontres initiales s'intitulent "*Mobilité et transport*", elles se nomment à présent "*Mobilité et territoire*". Les interactions entre mobilité et territoire sont par conséquent très fortes.

1.3.1. Liens entre dynamiques territoriales et mobilités

En arrière plan à la plupart des dynamiques territoriales observées et étudiées s'inscrit l'idée de mouvement, voie de déplacement reliant différents lieux du territoire. Marc Wiel corrobore ce constat par l'affirmation suivante : "*Les diverses formes de dynamiques territoriales induites par l'évolution de la mobilité se déclinent principalement à deux*

échelles du territoire concerné : à l'échelle de la zone d'emploi (nouvelle échelle urbaine pour de nombreux auteurs) et à l'échelle régionale et au-delà." [Wiel, 1999].

A l'échelle urbaine, trois types de dynamiques territoriales majeures peuvent être amorcées ou amplifiées par la mutation des pratiques de mobilité.

Primo, l'accroissement de la mobilité est à la fois, cause et conséquence de l'étalement urbain. D'une part, les mutations de la mobilité expliquent l'étalement urbain puisque les ménages acceptent des déplacements domicile-travail et une mobilité quotidienne plus longue en distance (mais pas nécessairement en temps) sur le lieu de vie. D'autre part, les évolutions de la mobilité s'expliquent partiellement par l'étalement urbain, notamment par l'exurbanisation des activités qui obligent les salariés, soit à se déplacer quotidiennement vers les périphéries urbaines, soit plus sûrement à résider dans le périurbain. Ceci explique par ailleurs l'importance prise par les déplacements urbains de périphéries en périphéries.

Secundo, les mutations de la mobilité engendrent "*une partition de l'espace notamment urbain, en unités de voisinage*" [Wiel, 1999, *op. cit.*]. Il s'agit d'un éclatement des lieux de résidence et d'emploi du fait de la disparition des contraintes liées à l'accessibilité aux lieux. Ces processus produisent notamment la multipolarisation des villes. Les agglomérations sont maintenant comparées à des archipels agrégeant des îlots plus ou moins indépendants des uns des autres.

Tertio, il apparaît que les nouvelles pratiques de mobilité génèrent une "*concentration spatiale de la précarité et de la richesse*" [Wiel, 1999, *op. cit.*], c'est-à-dire une forme de ségrégation spatiale, dans la mesure où les quartiers les plus défavorisés (là où il y a plus de personnes à revenu très modeste pour s'acheter une voiture par exemple) sont constamment les moins desservis en quantité (ligne de nombre de bus par exemple) et en qualité (dégradations, violences, etc.). Il s'agit là de la dimension sociale de la mobilité dans sa relation avec le territoire, en l'occurrence, urbain. C'est également une des conséquences de la multipolarisation des villes. Dans ces conditions, la mobilité semble renforcer les inégalités entre territoires et plus particulièrement entre espaces situés à l'intérieur des agglomérations.

A l'échelle régionale et au-delà, l'évolution de la mobilité conduit à deux mutations spatiales majeures. Il s'agit d'abord de la spécialisation des territoires liée à celle du système de production de biens et des différentes organisations logistiques des entreprises. Parallèlement, les processus de métropolisation sont également renforcés par

les nouvelles pratiques de mobilité. Ils accentuent la concentration des services situés dans les principales agglomérations. Entraînée notamment par les économies d'agglomération, la métropolisation prend toutefois de nouvelles formes avec la mobilité, puisqu'elle s'étend maintenant par "grappes de villes" constituées en réseaux au sein de vastes régions urbaines.

L'explosion et la mutation des pratiques de mobilité, liées à l'amélioration des facilités de déplacement se mesurent surtout par la hausse des distances parcourues et la stabilité voire la diminution des temps de parcours. Elles participent et fournissent à la fois une réponse aux dynamiques territoriales qui se développent dans les villes. Aussi est-il légitime de s'interroger sur l'évolution de la place occupée par les questions de mobilité dans les différentes politiques territoriales des acteurs institutionnels.

1.3.2. De la prise en compte de la mobilité dans les politiques d'aménagements urbains et régionaux

L'idée même de fluidification en ce qui concerne l'urbanisme et l'offre de transport suppose que les structures sociales et territoriales s'estompent au profit d'un contexte capable d'accueillir les aspirations les plus diverses. Dans les six agglomérations (Besançon, Grenoble, Toulouse, Berne et Lausanne) étudiées dans le cadre du projet PREDIT [Kaufmann, et *al.*, 2001], un modèle de vie urbain s'impose : il marque le territoire à travers la planification et l'appareil législatif, et ne correspond qu'aux aspirations d'une partie de la population. Le modèle de vie urbain qui est apparu comme dominant en France est l'expression d'une culture : la manière dont est pensée, habitée et pratiquée la ville est différente en Allemagne ou en Grande Bretagne. Dans ces pays, elle ne se pose pas comme en France en termes d'opposition entre une ville-historique d'immeubles anciens et une ville périurbaine faite de maisons individuelles et de zones d'activités dispersées. Les formes urbaines et leurs accessibilités se construisent selon d'autres modalités. Ainsi, l'offre urbaine, les conditions d'accès à cette offre et la valeur attribuée aux différents usages possibles de la ville sont spécifiques à chaque contexte. En ce qui concerne la motilité, ces observations débouchent sur deux enseignements. D'une part la motilité est formatée par le contexte, qui incite à se doter de certains accès plutôt que d'autres, à acquérir certaines compétences et s'approprier les accès de telle manière plutôt que de telle autre. D'autre part, les différentes aspirations et projets sont

susceptibles de se réaliser plus ou moins facilement suivant qu'ils sont ou non en prise avec les modes de vie dominants.

L'analyse des politiques publiques nous apprend qu'urbanisme et offre de transport relèvent largement de la coordination entre politiques sectorielles. Par exemple, l'impact sur les accessibilités d'une politique de développement des transports publics dépend largement de sa coordination avec la planification urbaine : si l'urbanisation se développe essentiellement en dehors des périmètres desservis, cet impact sera beaucoup plus réduit que si l'urbanisation se développe dans des quartiers desservis. Cet état de fait résulte de la complexité croissante des interdépendances entre les politiques sectorielles, qui nécessitent une coordination de plus en plus poussée.

1.3.3. Du POS à la loi SRU

La loi SRU a entièrement réécrit les chapitres consacrés au schéma directeur et au plan d'occupation des sols (POS) pour leur substituer respectivement le schéma de cohérence territoriale (SCoT) et le plan local d'urbanisme (PLU). Elle consacre également les cartes communales en les considérant comme des documents d'urbanisme à part entière pouvant offrir une alternative à l'élaboration des plans locaux d'urbanisme. Afin de mieux encadrer l'élaboration de ces nouveaux documents, la loi a également redéfini des objectifs généraux des documents d'urbanisme qui se déclinent en trois principes : le principe d'équilibre entre l'aménagement et la protection des territoires, le principe de mixité sociale et urbaine et le principe d'utilisation économe de l'espace.

☞ Le principe d'équilibre entre aménagement et protection consiste à trouver, comme son nom l'indique, un équilibre entre le besoin pour les communes de proposer des espaces constructibles pour l'accueil de populations nouvelles, mais aussi la nécessité d'assurer la préservation des espaces naturels. Le principe d'équilibre vise donc à concilier ces deux données (besoin de se développer et nécessité de protéger), qui ne sont cependant pas contradictoires. Certes, la croissance urbaine se fait de façon inéluctable au détriment des espaces naturels, mais la mutation de ces espaces lorsqu'elle est rendue nécessaire, doit répondre aux besoins de la commune. En d'autres termes, une commune qui constituerait des zones de future urbanisation de superficie trop importante par rapport à la faible croissance de sa population observée lors des derniers recensements ne respecterait pas le principe d'équilibre et s'exposerait à l'annulation de son document.

☞ Le principe de mixité urbaine, nouvellement introduit par la loi, doit aboutir à mettre un terme à la conception fonctionnaliste des villes qui a prédominé durant ces dernières décennies. Le Corbusier (de son vrai nom Charles-Édouard Jeanneret-Gris) publia en 1943 La Charte d'Athènes dans laquelle il écrivit que “[...] *par son essence, l’urbanisme est d’ordre fonctionnel. Les trois fonctions fondamentales à l’accomplissement desquelles l’urbanisme doit veiller sont : habiter, travailler et se recréer*”. Cette conception de l’urbanisme doit être aujourd’hui surmontée. La fonctionnalisation de la ville et son découpage en zonage ont abouti aux problèmes récurrents que connaissent aujourd’hui certaines villes : cités-dortoirs ici, bureaux là, commerces ailleurs, etc. Les répercussions en termes de circulation automobile et d’engorgements à l’entrée des villes sont bien connues. Le principe de mixité urbaine doit aboutir à la multi-fonctionnalité des espaces et non plus à leur juxtaposition. Le principe de mixité sociale a pour objet, quant à lui, d’éviter les phénomènes de ghettoïsation et de ségrégation sociale en favorisant la cohabitation entre logements sociaux et logements non sociaux. Si le PLU doit être l’instrument d’une politique locale d’aménagement, il lui revient aussi de devenir un document de politique sociale.

☞ Le principe d’une utilisation économe de l’espace et d’une préservation des ressources naturelles : l’espace, qu’il soit urbain, périurbain ou rural, doit être considéré comme un bien rare, dont l’utilisation ne doit pas conduire à son gaspillage. Sans inciter à la réalisation de tours et de barres, les SCoT et les PLU devront gérer l’espace convenablement, c’est-à-dire, faire en sorte que la ville puisse être un lieu d’épanouissement pour ses habitants en leur offrant un cadre de vie satisfaisant, sans toutefois hypothéquer l’avenir des générations futures. C’est le principe même du développement durable. *“Cet objectif doit permettre de maîtriser l’expansion urbaine périphérique et le mitage, en réduisant les surfaces à urbaniser, dans une perspective de sauvegarde des espaces naturels. L’espace urbanisable doit donc être restreint, ce qui signifie que le développement urbain doit avoir lieu, autant que faire se peut, dans la ville existante. Cela passe notamment par la réurbanisation des quartiers sous-densifiés ou des friches et par des opérations de renouvellement urbain”*⁵.

⁵ Patrick Rimbart, Rapport Assemblée nationale n° 2229, tome 1, p.49.

1.4. La mobilité comme moteur de la dynamique urbaine

Il n'est point besoin de prouver la nature polysémique du concept de mobilité. Même si la définition du concept de mobilité varie d'une discipline à l'autre, dans son acceptation la plus élémentaire, elle présente une caractéristique tridimensionnelle (Figure 1.2) :

- une dimension spatiale : la distance physique du déplacement entre deux lieux lorsque la mobilité est perçue comme un mouvement physique quantifiable selon une métrique. Dans le cas où elle est perçue comme un mouvement exclusivement qualitatif, la dimension spatiale se réfèrera à l'endroit où a lieu la mobilité.
- une dimension temporelle : la durée nécessaire à la réalisation effective de la mobilité.
- une dimension causale : les motivations qui justifient la mobilité.

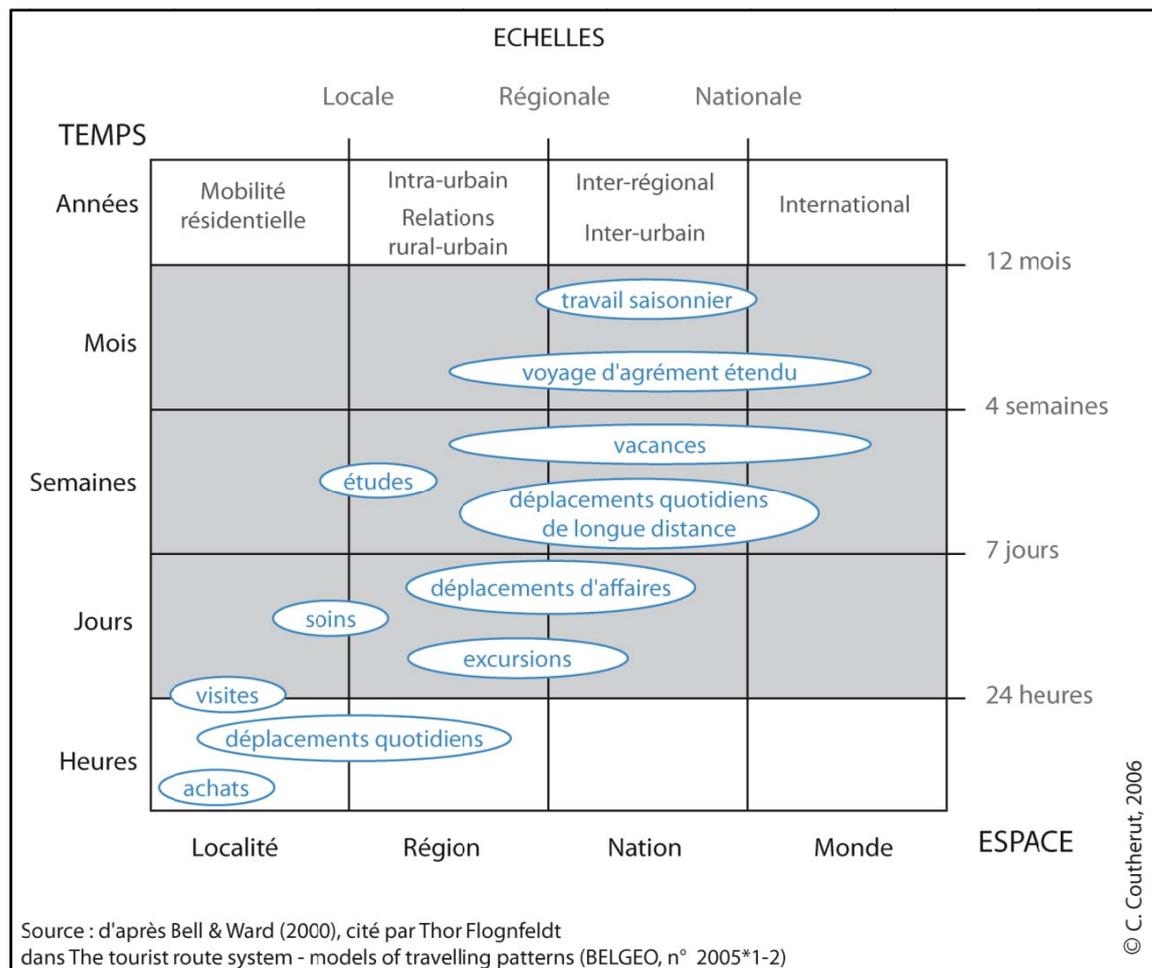


Figure 1.2 : La mobilité des populations dans le temps et l'espace

Avant d'aller plus loin dans l'analyse du rapport entre mobilité et la ville, nous précisons le type de mobilité à laquelle nous nous intéressons dans ce travail.

1.4.1. La mobilité résidentielle vue comme productrice de territoire

En remettant en cause la différenciation classique entre ville et campagne, la périurbanisation à l'œuvre depuis près de trois décennies constitue le phénomène principal qui affecte la localisation spatiale des ménages et des activités. Elle transforme ainsi grandement l'organisation des territoires. En effet, les diverses exploitations des données du recensement de 1999 par le Certu (Centre d'études sur les réseaux de transport et l'urbanisme) montrent que cette tendance ne s'infléchit pas, même si la population des villes-centres est en légère croissance : en moyenne chaque année, 1% des ménages, dont au moins un des conjoints travaille au cœur des agglomérations, quitte celles-ci pour aller s'installer en milieu périurbain. Parallèlement, si les emplois et les équipements continuent à se développer dans les agglomérations, il se produit un phénomène de délocalisation vers les périphéries, qui fait perdre au centre traditionnel son monopole ou son hégémonie antérieurs. Cette délocalisation est structurée par le développement des réseaux de voirie rapide qui permettent une bonne accessibilité vers le milieu périurbain. Ce faisant, elle engendre autour des espaces périphériques des zones de chalandise maximale [Certu, 2005]. Ce processus traduit une transition urbaine correspondant à l'adaptation des structures urbaines à la mobilité automobile. Ce double processus de délocalisation des hommes et des emplois a pour conséquence la ségrégation sociale [Caruso, 2003] au plan de l'habitat, et la spécialisation fonctionnelle au plan des activités. Aussi, l'écart entre les dynamiques résidentielles et les dynamiques d'activités a pour effet de renforcer la spécialisation fonctionnelle des espaces et de réduire la mixité habitat-emploi-activité.

Si ces dynamiques spatiales sont étroitement liées à une évolution fondamentale des conditions de la mobilité urbaine, elles renforcent en retour cette même évolution de la mobilité qui est à l'origine de ces dynamiques. En d'autres termes, la cause devient conséquence et la conséquence se métamorphose en cause. Il y a donc une relation systémique, une boucle de rétroaction entre ces deux phénomènes.

1.4.2. La dynamique résidentielle dans le SCoT de la CAGB : un cas d'école

Le Diagnostic d'agglomération et le projet de Programme Local de l'Habitat (PLH) de la Communauté d'Agglomération du Grand Besançon (CAGB) dans le cadre du SCoT (cf. Figure 1.3 et Figure 1.4), ont mis en évidence quelques risques relatifs à l'étalement urbain : l'allongement des distances parcourues pour les déplacements domicile-travail induit des coûts supplémentaires pour les transports et les équipements, de la pollution et une congestion croissante des axes routiers reliant Besançon et sa proche couronne à la périphérie. Ainsi, une huitaine d'actions et mesures sont identifiées pour palier ces risques [ThéMA, 2005].

1. Structurer l'urbanisation à partir du réseau de transport en commun, notamment en tenant compte des aires de chalandise des gares et privilégier l'urbanisation proche des axes de transport existants ou structurants.
2. Respecter les équilibres, les mixités et les diversités en matière de logement, dans une gestion économe et durable de l'espace. Equilibrer la part de maisons individuelles au regard du parc locatif. Répartir de manière plus équilibrée l'habitat locatif entre Besançon et le périurbain.
3. Limiter l'éparpillement des zones d'habitat. Limiter l'étalement urbain diffus. Limiter le mitage de l'espace. Réduire la taille des lots.
4. Densifier l'habitat dans les bourgs-centres et sur la commune de Besançon. Structurer l'agglomération autour d'une ville-centre forte et au potentiel important : développement prioritaire de la commune de Besançon. Maîtriser le développement urbain autour d'un hyper-centre (la Boucle), des centralités secondaires dans Besançon et des bourgs-centre.
5. Reconvertir des friches industrielles. Recycler et reconvertir certains espaces (renouvellement urbain au sein de la commune de Besançon).
6. Limiter l'ouverture de nouveaux espaces à l'urbanisation (de type lotissements pavillonnaires), excepté sur la commune de Besançon (renforcement de l'attractivité résidentielle grâce à l'émergence de nouveaux quartiers : Les Grands Bas, Vaites, etc.).
7. Développer une «agglomération verte non agglomérée».

8. Freiner l'urbanisation hors de la CAGB.

L'objectif de ces actions et mesures est de contre-balancer, entre autres, trois effets néfastes de l'étalement urbain à savoir :

- le double mouvement migratoire en défaveur de Besançon et sa proche couronne (6600 personnes ont quitté cette zone pour le reste de la CAGB et 6750 pour aller hors de la CAGB)
- Le nombre toujours croissant de déplacements domicile-travail en voiture.
- La ségrégation socio-spatiale, c'est-à-dire la concentration de certaines catégories sociales en certains lieux de l'agglomération. Or, la structure du parc de logement conditionne, voire contraint fortement, les choix résidentiels, dont celui de la résidence principale. Ainsi, la demande locative ne peut être presque exclusivement satisfaite que par la commune de Besançon, qui compte pas moins de 92% des logements locatifs de la CAGB, avec la particularité de présenter un niveau de loyer élevé dans le parc privé et une offre HLM socialement marquée. De l'impossibilité pour des ménages jeunes de trouver une offre de logement (notamment locative) en périurbain résulte la très forte diminution du nombre d'enfants dans certaines communes. Ainsi, la concentration de certains types de logements en certains lieux et son corollaire, l'absence d'autres types de logements en ces mêmes lieux, aboutissent à l'impossibilité de satisfaire la demande d'un grand nombre de personnes en matière de choix résidentiel.
- Le mitage de l'espace et l'éparpillement non maîtrisé des maisons individuelles (baisse de la qualité paysagère).

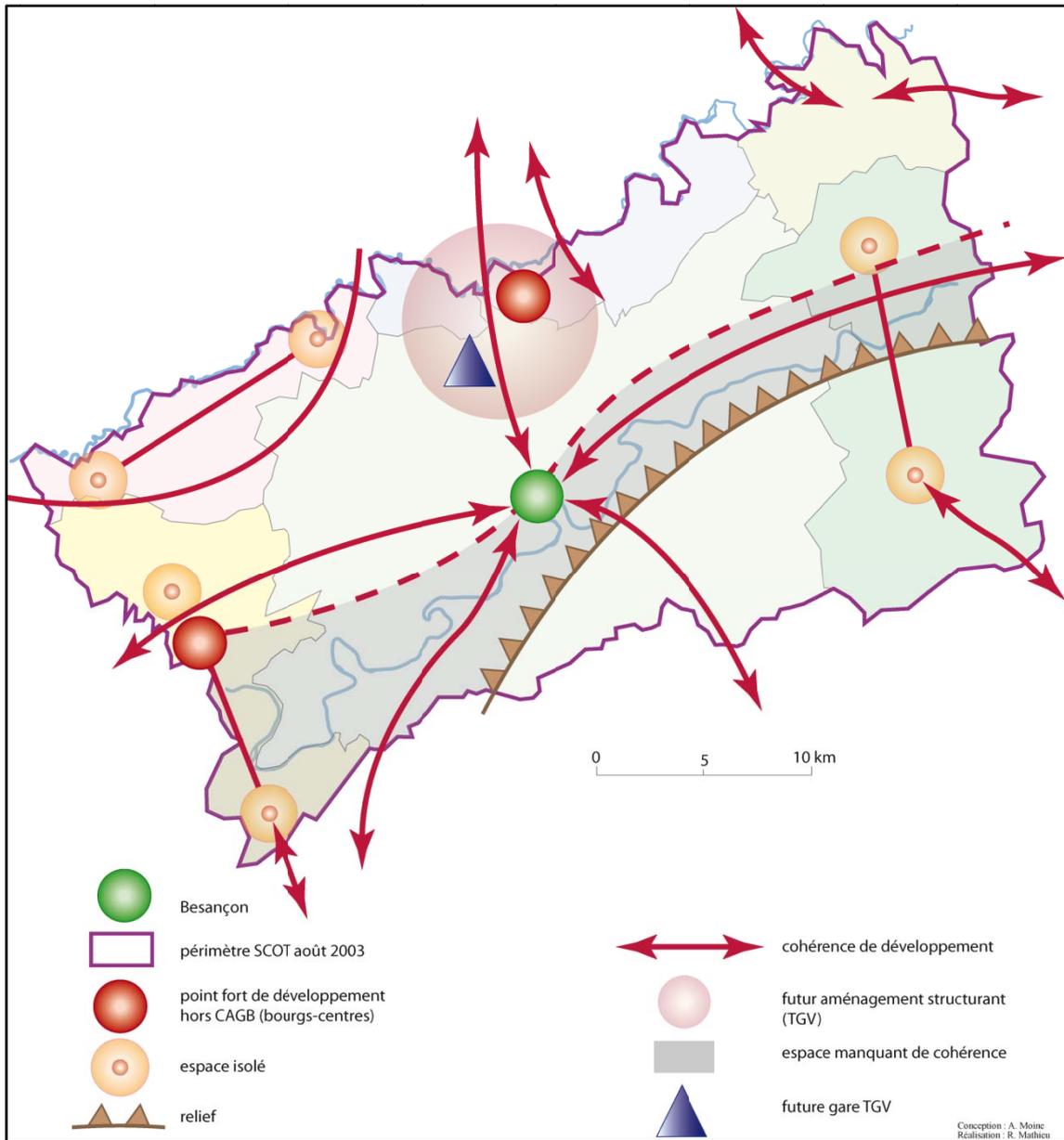


Figure 1.3 : Le Schéma de Cohérence Territoriale

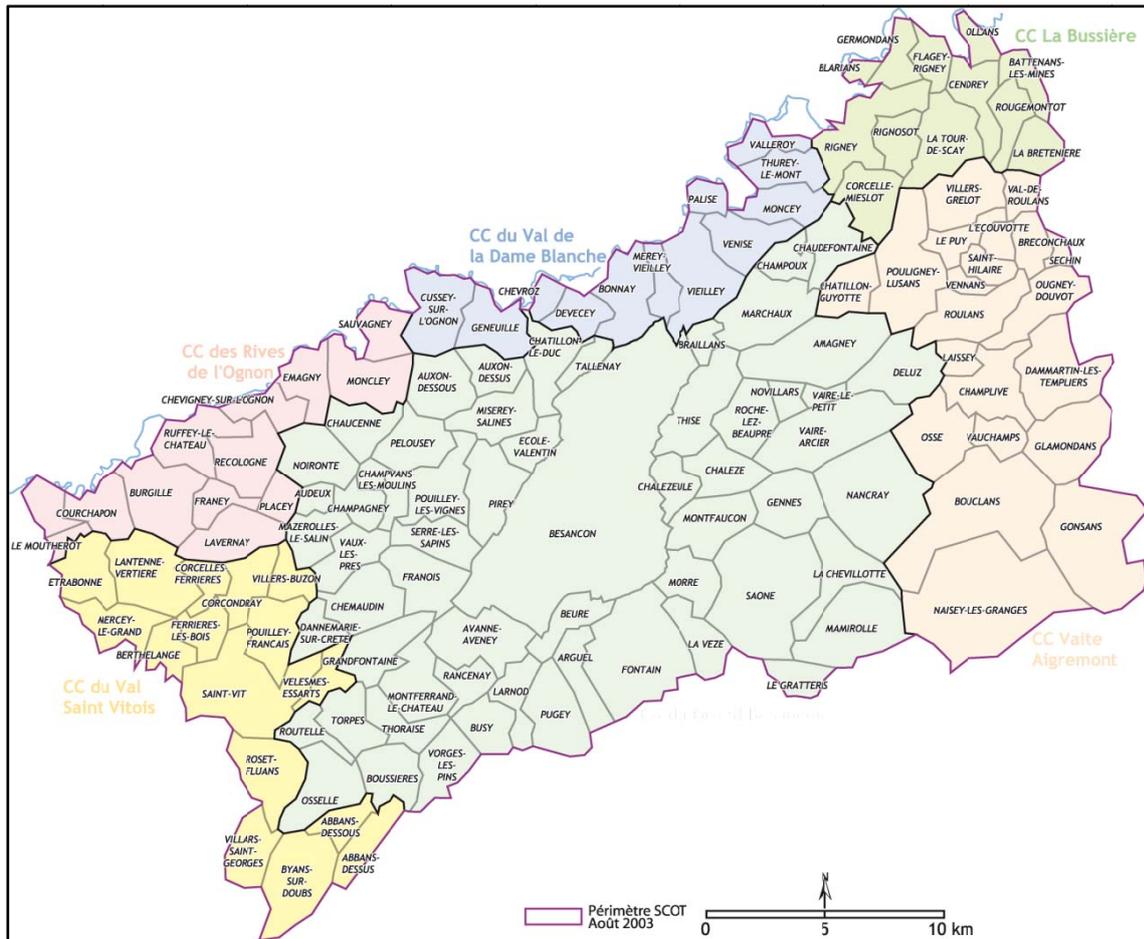


Figure 1.4 : Les périmètres d'intervention au sein de SCOT de la CAGB

Source AUDAB, 2006

La dynamique urbaine repose plus sur les projets des acteurs que sur la planification (même si celle-ci est indispensable voire incontournable). La mobilité facilitée ouvre les espaces de choix pour les ménages, les entreprises, les services, et permet aux uns et autres d'optimiser leur choix de localisation. Que sait-on alors des stratégies de localisation des ménages dans l'espace intra-urbain ? Comment se forme l'image des territoires résidentiels ? Quels sont les critères de choix des logements pour les diverses catégories de ménages ? Comment les conditions de mobilité interviennent-elles dans les stratégies de mobilité résidentielles ? L'intensité des processus ségrégatifs est-elle (ou au moins pour partie) liée à la mobilité facilitée des uns, à l'immobilité des autres ? Plus globalement, comment construire un modèle de dynamiques urbaines, partant de l'histoire et de la forme actuelle, intégrant la multiplicité des enseignements des travaux sur les mobilités quotidiennes et résidentielles afin de simuler l'évolution des structures et formes socio-spatiales urbaines à moyen terme.

Pour mieux répondre à ces interrogations, une première démarche est de chercher à comprendre la mobilité résidentielle, les motivations qui lui sont sous-jacentes ainsi que les relations qu'entretiennent les ménages avec leur habitat.

Bibliographie référencée

[Allemand et al., 2004] S. Allemand, F. Ascher, J. Levy. Les sens du mouvement. Modernité et mobilités dans les sociétés urbaines contemporaines. Colloque de Cerisy/Institut pour la ville en mouvement, 2004

[Andrieux, 1989] D. Andrieux. Mobilité professionnelle et mobilité géographique: Similitudes et différences de comportement de quelques catégories d'actifs. Economie méridionale, 1989.

[Aubry, 1988] B. Aubry. Les migrations interrégionales depuis 30 ans : de l'attrance à l'indifférence... et vice versa. Economie et statistique n° 20, 1988

[Audard, 2006] F. Audard. Modélisation de la mobilité. La génération de trafic à l'échelle régionale. Thèse de doctorat de l'Université de Franche-Comté. Besançon, 2006

[Bonvalet et Brun, 2002] C. Bonvalet, J. Brun. Etat des lieux des recherches sur la mobilité résidentielle en France in L'accès à la ville : les mobilités spatiales en questions, Paris ; Budapest ; Torino, L'Harmattan, 2002

[Caruso, 2003] G. Caruso. Un modèle cellulaire et dynamique des dispersions et ségrégation spatiale périurbaine. XXXIX^{ème} colloque de l'ASRDLF. Lyon 1-3 septembre 2003. Disponible sur : <http://asrdlf2003.entpe.fr/pdfpapiers/A2/40.pdf> (consulté le 12.12.2004)

[Courgeau, 1988] D. Courgeau. Méthodes et mesure de la mobilité spatiale. Migrations internes, mobilité temporaire, navettes, Paris, INED, 1988.

[Cwerner, 1999] B. Cwerner. The times of migration, a study of the temporalities of the immigrant experience, PhD in sociology, Lancaster University, 1999.

[De Singly, 2000] F. De Singly. Libres ensemble – l'individualisme dans la vie commune, Éditions Nathan, Paris, 2000.

[Foltête et al., 2002] J-C. Foltête, C. Genre-Grandpierre, H. Houot H, M. Flitti. Structures urbaines, offres de transport et comportements de mobilité, Université de Franche-Comté, Laboratoire Théma, 2002.

[Hochschild, 1997] A. Hochschild. The time bind. When work becomes home and home becomes work, Metropolitan Books, 1997.

[Kaufmann, 2000] V. Kaufmann. Mobilité quotidienne et dynamiques urbaines. La question du report modal, Science, Technique, Société. Presses polytechniques et universitaires romandes, 2000.

[Kaufmann et al., 2001] V. Kaufmann, C. Jemelin, J-M. Guidez. Automobile et modes de vie urbains : quel degré de liberté ? La Documentation Française, Paris, 2001

[Kaufmann et al., 2004] V. Kaufmann, M. Schuler, O. Crevoisier, P. Rossel. Mobilité et motilité. De l'intention à l'action. Cahier du LASUR n°4, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, février 2004.

[Lelièvre et Lévy-Vroelant, 1992] E. Lelièvre, C. Lévy-Vroelant. La ville en mouvement : Habitat & Habitants, Edition L'HARMATTAN, Collection villes et entreprises, 1992.

[Lévy, 2000] J. Lévy. Les nouveaux espaces de la mobilité, in Les territoires de la mobilité, PUF, Paris 2000.

- [**Marzloff, 2005**] B. Marzloff. Mobilités, trajectoires fluides. Editions CERTU, 2005
- [**Moine, 1995**] A. Moine. Modélisation de la demande de logements en zone frontalière. Un outil d'aide à la décision appliquée au marché local de Morteau (Doubs), Thèse de doctorat de l'Université de Franche-Comté, 1995.
- [**Offner et Pumain, 1998**] J-M. Offner, D. Pumain. Réseau et territoire, significations croisées, Editions de l'Aube, La Tour d'Aigues, 1998.
- [**Orfeuil, 2000**] J-P. Orfeuil. L'évolution de la mobilité quotidienne. Comprendre les dynamiques, éclairer les controverses, Synthèse Inrets n° 37, 2000.
- [**Potier, 1996**] F. Potier. Le tourisme urbain : les pratiques des Français, Inrets, 1996.
- [**Bellanger et Marzloff, 1996**] F. Bellanger, B. Marzloff. Transit, Éditions de l'aube, La Tour d'Aigues, 1996.
- [**Remy, 2000**] J. Remy. Métropolisation et diffusion de l'urbain : les ambiguïtés de la mobilité, in Les territoires de la mobilité, PUF, Paris, 2000.
- [**Saint-Julien, 2001**] T. Saint-Julien. Processus de diffusion spatiale et modélisation du changement in Modèles en analyse spatiale ; Edition Hermès, Paris, 2001.
- [**Salomon et al., 1993**] I. Salomon, P. Bovy, J-P. Orfeuil. A Billion Trips a Day, Dordrecht, Kluwer Academic Publishers, 1993.
- [**Sanders, 1990**] L. Sanders. L'analyse statistique des données en géographie, Montpellier : Alidade Reclus, 1990.
- [**Schuler et al., 1997**] M. Schuler, B. Lepori, V. Kaufmann, D. Joye. Eine Integrative Sicht des Mobilität. in Hinblick auf ein neues Paradigma des Mobilitätsforschung, Bern Schweizerischer Wissenschaftsrat, 1997.
- [**Taffin, 1987**] C. Taffin. La mobilité résidentielle entre 1979 et 1984, Données sociales, vol. 5, Urbanisation et usages de l'espace, INSEE, 1987.
- [**ThéMA, 2005**] E. Dubos-Paillard, P. Frankhauser, A. Moine, S. Ormaux, P. Signoret, C. Tannier. Schéma de Cohérence Territoriale (SCOT). Livre Blanc. Laboratoire ThéMA, UMR, 6049, CNRS, Université de Franche-Comté. Besançon, 2005.
- [**Thumerelle, 1986**] J-P. Thumerelle. Peuples en mouvement. La mobilité spatiale des populations. Paris, SEDES, 1986.
- [**Urry, 1990**] J. Urry. The Tourist Gaze, Editions Sage, London, 1990.
- [**Urry, 2000**] J. Urry. Sociology beyond Societies, Mobilities for the Twenty First Century, Edition Routledge, London, 2000
- [**Whitelegg, 1997**] J. Whitelegg. Critical Mass, Edition Pluto, London, 1997.
- [**Wiel, 1999**] M. Wiel. La transition urbaine, Edition Sprimont, Mardaga, 1999.

2

LA MOBILITÉ RÉSIDENTIELLE : MESURE, DYNAMIQUES ET DÉTERMINANTS

Chaque problème définit son propre espace d'information

S. Schwartz

Si l'on s'intéresse à la manière dont les habitants d'une ville exploitent leur espace quotidien pour mieux comprendre leur comportement, et être apte à proposer des aménagements adaptés aux besoins et aux souhaits les plus fréquents, il est indispensable de pouvoir traduire en termes d'indicateurs la cognition spatiale des individus. Pour parvenir à cette fin, les équipes de recherche mettent de plus en plus en avant les atouts du travail collaboratif et pluridisciplinaire. Ainsi, psychologues, démographes, économistes, géographes, sociologues, philosophes se penchent davantage sur des thématiques socio-spatiales [Levy, 2002] afin d'uniformiser leurs méthodes et outils d'analyse pour mieux comprendre comment les hommes s'adaptent aux différents changements à l'œuvre dans la société contemporaine, qu'il s'agisse de l'activité économique, la vie privée, le progrès technique, ou encore les formes d'urbanisation. L'étude de la mobilité résidentielle, que l'on ne peut dissocier de celle des autres formes de mobilité, notamment la mobilité quotidienne, se révèle être un bon "indicateur" (on l'a vu dans le chapitre précédent) des transformations sociales, démographiques, politiques, économiques qui traversent le monde urbain. En effet, la mobilité n'est « *jamais seulement un déplacement, mais toujours une action au cœur des processus sociaux de fonctionnement et de changement* » [Bassand et Brulhardt, 1980]. Aussi, pour une meilleure appréhension des logiques comportementales qui coordonnent les mobilités résidentielles des ménages et/ou des individus, la prise en compte simultanée de nombre de facteurs s'imposent : aspects socioculturels, affects

psychologiques, paramètres démographiques, qualités environnementales, contraintes économiques etc. La question du choix et des besoins en matière de logement ne résulte plus d'une simple et seule évaluation des avantages et des inconvénients faite par les acteurs eux-mêmes à chaque étape de leur cycle de vie. Elle incorpore également des effets induits plus qualitatifs que quantitatifs, émanant de divers systèmes exogènes (la sphère affective par exemple) dont l'influence sur les pratiques de mobilité résidentielle est non négligeable.

Après une présentation sommaire de l'état des lieux de la recherche en matière de mobilité résidentielle, nous analyserons les diverses dynamiques (structurelles, contextuelles et temporelles) de la mobilité résidentielle à partir des interactions entre les sous-systèmes "habitat" et "habitants". Une description de l'ensemble des déterminants nous permettra de mieux cerner les logiques de localisation résidentielle en vue de la construction d'un modèle de simulation.

2.1. Mesures et évolution des connaissances sur la mobilité résidentielle

Aux lendemains de la seconde guerre mondiale, la situation du logement était dramatique en Europe. En France, le déficit de construction de la période de l'entre-deux-guerres, ajouté aux destructions de la seconde guerre (500 000 logements détruits, 1 400 000 logements endommagés)¹, se traduit par une pénurie de logement sans précédent. Dès 1946, A. Sauvy publia un article « Logement et population » [Sauvy, 1946] dans lequel il explique, entre autres, la raison principale de la pénurie de logement et du marasme de l'industrie du bâtiment. Naturellement, s'imposa alors la mise en œuvre d'une politique de logement. Afin de produire les données devant alimenter les débats relatifs aux choix politique en matière de logement, l'INED (Institut National d'Etudes Démographiques) a élaboré des sources d'informations sur les migrations résidentielles.

2.1.1. Les sources de données pour mesurer la mobilité résidentielle

Outre les enquêtes ponctuelles réalisées par diverses institutions dans le but d'affiner une étude thématique bien précise, ou de calibrer un modèle particulier, il existe principalement trois sources de données, à l'échelle nationale, permettant de mesurer la mobilité résidentielle. Il s'agit du recensement, de l'Enquête-Logement et des fichiers relatifs au logement communal (FILOCOM : Fichier du LOGement COMmunal).

2.1.1.1. Le recensement et ses limites

Le recensement constitue une source essentielle de données sur la mobilité. Avant la seconde guerre mondiale, les réponses aux questions sur le lieu de naissance, croisées avec les questions sur le lieu de résidence, fournissaient des éléments d'information sur les déplacements individuels. Depuis la période d'après guerre, cette approche est apparue très insuffisante pour étudier la mobilité dans toute sa complexité. Ainsi, à compter du recensement de 1962 en France, grâce à une question sur le lieu de résidence de l'année du précédent recensement, il est devenu possible de calculer la proportion des personnes ayant changé de logement entre deux recensements à l'aide des matrices de migration, ou,

¹ Ces chiffres sont tirés des cahiers du PIR Villes (Programmes interdisciplinaires de recherche sur la ville). En l'occurrence, il s'agit du volume « Logement, mobilité et populations urbaines » édité sous la direction de C. Bonavalet. CNRS Editions, Paris 1994, page 15.

pour éviter l'inconvénient de l'inégalité des intervalles entre deux recensements, des taux annuels de mobilité à différentes échelles spatiales. On peut alors suivre l'évolution de la mobilité au niveau de la commune, du département, de la région ou même au niveau national. La situation ne peut que s'améliorer avec la nouvelle fréquence (annuelle) du recensement en France même s'il est basé sur un échantillonnage, d'autant que les enquêtes annuelles sur l'emploi menées par l'INSEE fournissent le même type de renseignement rétrospectif, puisqu'elles s'accompagnent d'une question sur la commune de résidence des individus un an auparavant. Toutefois, ces "enquêtes-emplois" portant sur un échantillon au 1/100^{ème} de la population active ne permettent pas des études à un degré plus fin de mobilité. Mais elles offrent un suivi annuel du phénomène et aident ainsi à percevoir les tendances les plus récentes.

2.1.1.2. Les Enquêtes-Logement

Hormis le recensement général de la population, l'Enquête-Logement est l'une des principales enquêtes de l'INSEE de par son ancienneté (1955, date de sa première réalisation), sa fréquence (elle est réalisée environ tous les 4 ans mais une période de 5 ans sépare les 2 dernières enquêtes) et la taille de son échantillon (47 500 logements en 2002 dont 32 000 ménages répondants). Au niveau national, c'est la source statistique majeure pour décrire le parc de logements et les conditions d'occupation par les ménages de leur résidence principale. Sur ces thèmes, les enquêtes Logement sont en particulier beaucoup plus précises et plus complètes que les recensements. Les principaux thèmes abordés sont les suivants :

- ◆ les caractéristiques physiques du parc de logements (taille, confort sanitaire, chauffage, dépendances) ;
- ◆ une approche multicritères de la "qualité de l'habitat" : état du logement et de l'immeuble, fonctionnement de leurs équipements, bruit, exposition, localisation, environnement, voisinage, sécurité, etc. ;
- ◆ les modalités juridiques d'occupation du logement (forme et origine de la propriété, législation sur les loyers, aides de l'Etat) ;
- ◆ les difficultés d'accès au logement, la solvabilité des ménages, le fonctionnement des rapports locatifs ;

- ◆ les dépenses associées au logement (loyers, charges locatives ou de copropriété, prix et financement des logements achetés récemment, remboursements d'emprunt des accédants à la propriété, travaux, etc.) et les aides dont bénéficient les occupants ;
- ◆ les ressources perçues par les différents membres du ménage sous différentes formes : revenus d'activité, prestations sociales, revenus de placement, etc. ;
- ◆ le patrimoine en logements des ménages, l'utilisation de logements autres que la résidence principale ;
- ◆ l'opinion des ménages à l'égard de leur logement et de leur désir éventuel d'en changer ;
- ◆ le nombre d'enfants de la personne de référence et/ou de son conjoint (thème spécifique à l'enquête de 2002).

En ce qui concerne l'étude des conditions de logement des ménages à faible et très faible revenu, l'enquête logement comporte cependant trois limites importantes :

- ☞ c'est une enquête auprès des ménages, c'est-à-dire auprès des personnes de référence vivant dans une résidence principale. Celles vivant dans d'autres types d'habitat (foyers, maisons de retraite, centre d'hébergement, résidence secondaire, etc.) sont en dehors du champ de l'enquête, de même que les personnes sans domicile fixe;
- ☞ c'est une enquête à caractère national qui n'a pas vocation de fournir des résultats très fins, ce qui réduit les possibilités d'analyses géographiques des conditions de logement des ménages. Tout juste peut-on les approcher avec la notion de tranches d'unités urbaines;
- ☞ c'est une enquête dont l'échantillon, pourtant de grande dimension, s'avère parfois insuffisant dès lors que l'on cherche à préciser les conditions de logement de ménages connaissant des situations très minoritaires.

2.1.1.3. Les fichiers de logement communal

Issu d'une exploitation des données fiscales relatives à la taxe d'habitation, l'IRPP (Impôts sur le Revenu des Personnes Physiques) et la taxe foncière, ce fichier est disponible depuis 1995 pour le compte du Ministère de l'Équipement. Il est mis à jour tous les deux ans. En ce qui concerne le logement, les données du FILOCOM sont en général assez fiables en raison du caractère quasi exhaustif des données, et aux aspects non déclaratifs de certaines variables [CERTU, 2002]. Dans un récent rapport d'étude sur la répartition spatiale des logements, réalisé par le Programme ACTEUR (Analyse Concertée des

Transformations et des Equilibres Urbains) [CERTU, 2002, *op. cit.*], ce fichier a été utilisé comme source principale pour calculer des indicateurs de répartition spatiale des logements pour trois raisons. *Primo*, ce fichier permet d'effectuer des croisements entre des données caractéristiques du logement et d'autres relatives à la situation de leurs occupants. *Secundo*, les données sont disponibles à la section cadastrale et autorisent des exploitations infra-communales sous réserve du respect du secret statistique et de la disponibilité d'un cadastre numérisé sur le périmètre d'étude. *Tertio*, la valorisation de données peu connues ou peu utilisées comme celles issues du FILOCOM fait partie des objectifs du programme ACTEUR.

Toutes ces sources permettent d'analyser les principales caractéristiques des personnes mobiles et immobilières. Elles fournissent par ailleurs des informations essentielles sur les raisons des déménagements. Elles seront modélisées lors de la réalisation de notre modèle de simulation de la mobilité résidentielle.

2.1.2. Les différents angles d'analyse de la mobilité résidentielle

Les modes de vie évoluent à tous les niveaux. On peut noter, selon des observations parallèles, des changements dans les structures de l'économie et de l'emploi, dans les structures du parc de logement (notamment avec l'essor de la maison individuelle dans l'espace périurbain). Il en est de même de la structure des ménages avec la diminution des couples et l'accroissement des familles monoparentales [Bonvalet et Brun, 2002, *op. cit.*]. L'évolution des recherches sur la mobilité résidentielle reflète ces changements. Ainsi, on peut distinguer quatre façons d'aborder la question de la mobilité résidentielle [Bonvalet et Brun 2002, *op. cit.* ; Vidberg et Tannier, 1999 ; Dureau et *al.*, 2000], qui correspondent à la fois à des préoccupations des disciplines et à des courants de pensée. En effet, certains travaux rendent compte des choix de migration, de localisation, et de statut d'occupation à l'aide de modèles économétriques alors que d'autres analysent la mobilité en fonction des événements familiaux et professionnels. Une troisième catégorie de travaux étudie la mobilité à partir de l'évolution de la structure du parc de logement et de la structure socioprofessionnelle et démographique de ses occupants. Une dernière catégorie accorde une place essentielle aux liens qui se tissent entre les individus, les familles et les lieux. Ces différentes approches sont développées ci-après.

2.1.2.1. Mobilité résidentielle et comportement économique

Les logiques qui sous-tendent la plupart des travaux qui se sont penchés sur l'analyse des rapports entre comportement économique et mobilité résidentielle sont avant tout économiques, même lorsqu'ils sont effectués par des géographes ou des sociologues [Derycke, 1996]. Pour rendre compte des comportements de mobilité, les chercheurs font l'hypothèse que l'Homme est un être rationnel cherchant à optimiser ses choix. Tel est, par exemple, le cas de l'application de la théorie de l'utilité. La décision de migrer, d'acheter ou de louer un logement, de résider à tel endroit peut donc être représentée plus ou moins simplement à l'aide d'un modèle économétrique. Dans chaque cas, l'individu examine les avantages et les inconvénients des différentes possibilités qui s'offrent à lui et choisit celle qui lui est la plus favorable en termes économiques. Mais ces modèles présentent plusieurs limites : tous les individus sont considérés comme équivalents, l'information est supposée parfaite, le coût psychologique de l'émigration n'est pas pris en compte. En fait, comme l'ont remarqué Bassand et Rossel, « *tous ces modèles permettent seulement de mesurer la puissance de l'incitation matérielle à l'émigration ; ils ne permettent aucune inférence quand à la décision de migrer elle-même* » [Bassand et Rossel, 1990]. Avec le développement de la Nouvelle Economie Urbaine, ces hypothèses ont été assouplies. Ainsi, les consommateurs, en fonction de leur revenu et de la taille de leur ménage, peuvent faire des arbitrages entre certaines caractéristiques du logement d'une part, et la localisation mesurée par la distance au centre d'autre part. Certains auteurs [Anas, 1982 ; Arnott, 1985 ; Goodman, 1990] supposent que le choix du logement précède le choix de la localisation ; d'autres font l'hypothèse d'un choix simultané du logement et de la localisation. Toutefois, ces modèles permettent difficilement d'intégrer l'expérience des individus en matière de localisation et de mobilité. D'autres chercheurs [Ginsberg, 1979 ; Filippi, 1993, 1997 ; Clark et Onaka, 1983] ont introduit le temps et la notion de trajectoire résidentielle dans leur modèle afin de prendre en compte les effets d'anticipation et d'enchaînement de mobilité. Aussi, à la logique économique se superposent d'autres logiques relatives aux caractéristiques sociodémographiques des individus.

2.1.2.2. *Articulation entre carrière professionnelle, cycle de vie et mobilité résidentielle*

Parallèlement aux travaux sur le lien entre comportement économique et mobilité résidentielle, d'autres chercheurs se sont particulièrement attachés à étudier l'influence de la conjoncture économique sur la mobilité et à identifier les catégories de personnes concernées. Par exemple, entre 1978 et 1984, la baisse de la mortalité a affecté tous les groupes d'âges, mais ce sont les jeunes ménages qui ont été les plus mobiles [Taffin, 1987]. Les résultats du recensement de 1999 confirment cette tendance.

Alors que la mobilité à grande distance répond généralement à une insatisfaction de la situation économique locale, les déplacements à courte distance résultent davantage d'une insatisfaction à l'égard du logement. De même une modification de la taille du ménage est une des fréquentes raisons de changer de logement.

A partir d'une analyse transversale, les changements de logement liés aux naissances successives, par exemple, sont difficilement identifiables, dans la mesure où le calendrier des naissances n'est pas forcément le même que celui des déménagements. Néanmoins, Taffin et Courgeau [Taffin et Courgeau, 1988] montrent bien que la mobilité des ménages qui ont eu des enfants est plus élevée que celle des couples sans enfant.

En définitive, deux conclusions s'établissent : d'une part, le cycle de localisation résidentielle correspondrait à un processus d'adéquation entre la taille du ménage et celle du logement, et d'autre part, si l'emploi joue de moins en moins un rôle prépondérant dans la mobilité à l'intérieur des agglomérations, il reste un moteur de la migration lointaine. « *La mobilité spatiale apparaît ainsi comme un corollaire de la mobilité sociale* » [Weidlich et Haag, 1988].

2.1.2.3. *Statut social et mobilité résidentielle*

Les sociologues ont apporté un autre éclairage sur les choix opérés par les ménages en termes de statut d'occupation, de type d'habitat ou de localisation. L'idée essentielle de ces travaux [Allen et Sechet, 1988 ; Chombart De Lauwe, 1963 ; Guerand, 1967 ; Lugassy, 1985 ; Palmade, 1989 ; Petonnet, 1982, Bonetti, 1994] est que ces choix ne sont pas entièrement soumis aux règles ordinaires du marché et donc à une logique économique selon laquelle chaque ménage serait assigné à une localisation et un statut d'occupation précise en fonction de sa catégorie socioprofessionnelle, de sa position

dans le cycle de vie. D'autres logiques, familiales, sociales, affectives, peuvent entrer en ligne de compte. L'individu ou le ménage ne prendrait donc pas ses décisions uniquement en fonction de ses propres caractéristiques repérées à un moment donné, mais aussi en fonction d'autres critères sociaux, psychologiques, affectifs (comme l'attachement à un lieu par exemple), ou encore en fonction de groupes de référence qui peuvent être la famille, le groupe social dominant du quartier ou la communauté d'origine.

Ainsi, tout en soulignant les effets de la structure du parc de logements, de sa territorialisation, de la conjoncture économique et de la répartition des emplois sur le jeu des mobilités urbaines, les recherches récentes reconnaissent donc aux ménages l'existence d'une certaine marge de liberté dans leur façon d'ajuster leurs aspirations résidentielles à l'offre disponible [Brun, 1991] en usant de leurs choix préférentiels [Nicot, 2007].

2.1.2.4. Impact de l'offre de logement sur la mobilité résidentielle

La plupart des approches précédentes reposent sur l'idée d'un individu rationnel qui, en fonction de l'évolution de sa famille et de son revenu, cherche à adapter au mieux le type, la localisation et la taille de son logement. La dimension spatiale n'est pratiquement pas prise en considération au sens géographique du terme. Cependant, l'importance de la distribution spatiale du parc de logement n'est plus à démontrer. En effet, l'espace urbain n'est pas neutre, car il est à la fois "*un produit social, un milieu, et un enjeu pour les habitants comme pour les acteurs du logements et de la ville*" [Authier et al., 2001]. De nombreux travaux plus récents traitent de la répartition des classes sociales dans les agglomérations urbaines en fonction du parc de logement [Brun, 1991 ; Caruso 2003 ; CERTU, 2003]. Les relations entre catégorie sociale, parc de logements, espace urbain sont un élément essentiel des études sur la division sociale de l'espace ou sur la ségrégation socio-spatiale. Ces travaux débouchent sur l'analyse de la mobilité, qui n'est pas seulement étudiée à partir des déplacements des hommes, mais aussi à partir des variations du stock de logements du parc. Un des aspects les plus intéressants est de suivre avec précision les processus d'urbanisation et les phénomènes de valorisation et de dévalorisation des différents segments du parc. On se rend compte ainsi du rôle des différents parcs dans la mobilité résidentielle des ménages aux différentes étapes du cycle de vie. Les travaux de Lévy mettent bien en évidence les

différences entre cursus résidentiels en fonction de la classe sociale et des contextes d'habitat [Lévy, 2000, *op. cit.*].

On saisit l'intérêt de ces recherches qui abordent conjointement l'évolution du parc de logements et celles des ménages. Elles montrent bien comment les trajectoires résidentielles des ménages font évoluer la structure de l'espace résidentiel et comment, dans le même temps, l'espace résidentiel contraint et oriente les choix résidentiels des ménages. La section suivante présente une analyse approfondie de ces mécanismes.

2.2. Les dynamiques habitat-habitants

Les logiques résidentielles des ménages et les composantes (prix, disponibilité, etc.) de l'offre de logement sont étroitement liées. Leur interdépendance agit à la fois sur la mobilité résidentielle, les évolutions de l'offre et les caractéristiques d'occupation des logements. Ainsi, on sait que les ménages sont plus ou moins mobiles selon le type d'habitat qu'ils occupent. Les petits logements retiennent moins longtemps leurs occupants que les grands logements [Levy et Piazzoni, 1994]. Les occupants du parc social bougent moins que ceux du parc privé [Bonvalet et Gotman, 1993].

Ces dynamiques peuvent être appréhendées selon trois axes (*cf.* Figure 2.1). Le premier est relatif à la structure du parc immobilier, la composition du ménage et les modifications des usages des logements. Le second fait référence aux spécificités socio-spatiales de la zone d'étude alors que le dernier est lié au temps.

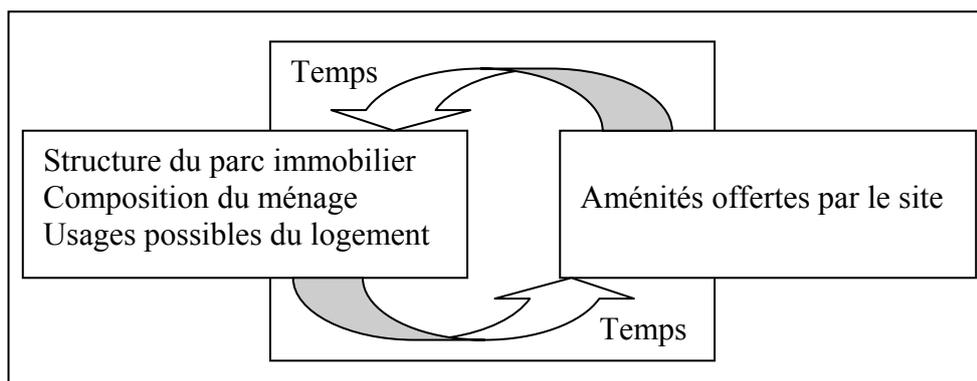


Figure 2.1 : *Dynamiques habitat-habitants*

2.2.1. Les dynamiques structurelles

Les interactions entre mobilité résidentielle et structure du parc immobilier sont sujettes à de multiples transformations. Certaines d'entre elles comme les destructions et les nouvelles constructions affectent la variation du stock de logement. D'autres sont plus complexes car elles touchent aux modifications des usages (par exemple la transformation d'un logement en bureaux ou inversement), à la modification des caractéristiques du logement (le nombre de pièces ou la surface, le confort, etc.) ou des statuts d'occupation (le passage du statut de locataire à l'accession à la propriété). L'ensemble de ces dynamiques révèle des logiques diverses et variées. Les municipalités peuvent impulser les constructions et les réhabilitations. Les fluctuations du marché immobilier peuvent amener les propriétaires et les promoteurs immobiliers à fusionner ou à éclater des logements. Toutes ces évolutions rétroagissent sur les choix résidentiels des ménages.

A l'inverse, les logiques résidentielles des ménages peuvent également expliquer le rapport entre les caractéristiques du parc immobilier et les mobilités résidentielles.

Par ailleurs, divers travaux [Clark et Onaka, 1983, *op. cit.* ; Lily et *al.*, 1992 ; Lars, 1992] ont montré que la mobilité résidentielle décroît avec l'âge et augmente avec le niveau de qualification, que la mobilité de longue distance est surtout liée à des causes professionnelles tandis que la mobilité de courte distance est davantage liée aux conditions d'habitation. En période de crise économique, la mobilité résidentielle a tendance à diminuer, notamment la mobilité de longue distance [Courgeau et Pumain, 1984]. Les approches biographiques [Bonvalet, 1987 ; Courgeau, 1988 ; Cribier, 1989] ont également permis de faire progresser la connaissance du phénomène, en replaçant la mobilité dans les différentes périodes du cycle de vie des ménages. Ainsi, la décohabitation, le mariage, la naissance d'un enfant, le divorce, la retraite sont autant d'évènements qui amènent le ménage à changer de logement, notamment parce qu'il faut ajuster la taille du logement à la taille de la famille.

De concert, les évolutions de l'offre de logement et les logiques résidentielles des ménages influencent l'orientation de la mobilité résidentielle. De façon générale, les ménages débutent leur parcours résidentiel dans le parc locatif et le terminent dans le parc en accession à la propriété [Courgeau, 1984 ; Louvot, 1992]. Ils ont également tendance à accroître la taille du logement au fur et à mesure des déménagements. Ces deux éléments expliquent partiellement le fait que les grands logements et ceux en accession à la

propriété connaissent une *faible mobilité* : ils se situent en fin de parcours résidentiel des ménages. En revanche, les occupants de petits logements sont très mobiles car ils sont le plus souvent en début de parcours résidentiel. Il existe cependant de fortes variations des parcours résidentiels selon les caractéristiques socio-économiques des ménages en mobilité. En effet, moins le ménage est aisé et plus ses choix résidentiels sont réduits. Le marché du logement est de plus en plus difficile d'accès aux ménages à faible revenu et il n'est pas facile pour ces derniers d'y évoluer car les filières de mobilité sont davantage cloisonnées [Vandekerckove, 1995 ; Levy, 1995].

2.2.2. Les effets de contexte

L'analyse des dynamiques structurelles a révélé la sensibilité des parcours résidentiels des ménages aux variations de l'offre de logement. Ceci suggère que les types d'habitat occupés par chaque ménage durant son parcours peuvent également varier selon les caractéristiques de l'offre locale. Quelques travaux comparatifs sur cette question montrent qu'il existe d'importantes variations dans la structure d'occupation d'un même type d'habitat localisé dans différentes communes [Lévy, 1995, *op. cit.* ; Maleyre, 1994 ; Vincent, 1986]. La qualification sociale (pour ne pas dire "stéréotype social") des villes ou des quartiers a des impacts sur l'occupation du parc, au travers d'une dépréciation des valeurs immobilières ou d'une spéculation sur ces dernières, et provoque ainsi des jeux complexes d'attraction ou de répulsion des différentes couches sociales. Ainsi, l'occupation du parc social d'une cité en crise apparaît plus paupérisée que celle des logements sociaux d'une ville ouvrière de banlieue. De même, les caractéristiques dominantes de l'habitat d'une commune influent sur l'occupation des types d'habitats minoritaires : un type d'habitat peu valorisé, comme le parc ancien inconfortable, va accueillir des ménages plus ou moins fragilisés ou en situation économique assez précaire selon qu'il se situe dans un quartier dominé par le parc en accession à la propriété, ou dans un quartier dans lequel il est lui-même dominant. Même si le type d'habitat prédispose à l'occupation d'une catégorie de population, son occupation ne prend réellement sens que dans le contexte socio-morphologique dans lequel il est situé [Soulignac, 1995 ; Micoud, 1974 ; Chamboredon et Lemaire, 1970]. Le contexte socio-morphologique a aussi des effets sur la mobilité des ménages. Les parcours résidentiels s'adaptent à la structure de l'offre locale et aux caractéristiques du peuplement même si le plus souvent les ménages mobiles se dirigent ou proviennent de l'extérieur de la

commune. Ces variations apparaissent très nettement lorsque le phénomène est observé à l'échelle communale. Ainsi, dans un article intitulé "La mobilité résidentielle dans le contexte local de l'habitat : une approche comparative en France" [Levy, 1992], JP. Levy montre qu'une forte proportion des ménages quittant l'habitat social roubaisien se dirige vers le parc ancien en accession à la propriété bon marché de la ville. Et au contraire, les sortants du parc social d'Aubervilliers ne trouvent pas ou peu ce type d'offre localement. De ce fait, ils retournent à l'intérieur du parc social et s'y stabilisent ou bien ils vont chercher ailleurs.

En résumé, les caractéristiques de l'offre locale provoquent des mécanismes de mobilité différenciés qui expliquent aussi, partiellement, les variations des structures d'occupation d'un même type d'habitat. En retour, les formes d'occupation qui en seront issues influenceront de futures ménages mobiles ; ce qui accentuera davantage la différenciation. Dès lors, il devient relativement plus aisé d'identifier les interactions à l'œuvre au sein de la dimension spatiale et les interactions entre les habitants c'est-à-dire les ménages. Ces deux types d'interaction sont respectivement modélisés par le biais d'automates cellulaires et de systèmes multi-agents (*cf.* Partie II). Cette identification se précise davantage lorsqu'on s'intéresse à la dimension temporelle du système résidentiel.

2.2.3. Les dynamiques temporelles

Comme nous l'avons fait remarquer dans les précédents paragraphes, la mobilité résidentielle est un phénomène tridimensionnel (habitat, habitants, temps). Pour une meilleure explication des mécanismes qui gouvernent les dynamiques temporelles, nous allons nous appuyer sur la figure 2.2. C'est une projection conceptuelle de l'espace tridimensionnel de la mobilité sur un plan.

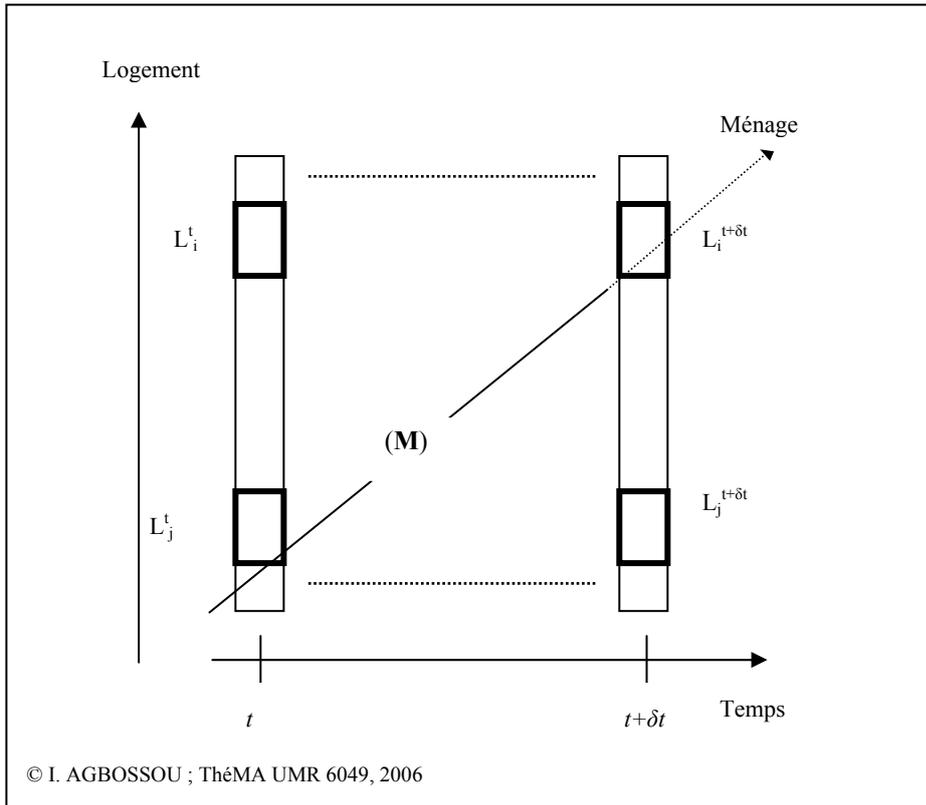


Figure 2.2 : *Dynamique temporelle de la mobilité résidentielle*

L'observation est longitudinale et s'opère entre les dates t et $t+\delta t$ incluses. Un ménage mobile (M) quitte le logement (L_i^t) qu'il occupait à la date t et emménage dans le logement ($L_j^{t+\delta t}$) qu'il occupe donc en $t+\delta t$.

L'analyse selon l'axe "Ménage" suit le parcours $\xrightarrow{L_i^t L_j^{t+\delta t}}$. Mais, en considérant le système

global, il pourrait y avoir de nouvelles arrivées dans le parc entre les moments t et $t+\delta t$: ce sont les ménages venant de l'extérieur du parc de la zone d'étude et les décohabitations. A l'inverse, certains ménages peuvent quitter un logement qu'ils occupaient dans le parc, sans réemménagement observable à $t+\delta t$: ce sont les ménages qui quittent la zone d'étude et les disparitions de ménage (plusieurs raisons peuvent en être la cause : décès, expropriation, expulsion, etc.).

L'analyse selon l'axe "Logement" peut être entreprise à partir d'une base de nouveaux emménagés dans le sens $\xrightarrow{L_i^t L_i^{t+\delta t}}$. Dans ce cas, le logement quitté (L_i^t) devra accueillir un

nouvel occupant présentant certaines caractéristiques et dont le choix aurait porté sur ce logement. En d'autres termes, les critères de choix de ce nouveau ménage auraient été satisfaits par les caractéristiques de ce logement. Il se peut donc qu'à la date $t+\delta t$, ce

logement reste vacant et fasse l'objet d'une nouvelle évaluation de la part des ménages à la recherche d'un logement à la date $t+2\delta t$.

2.3. Les déterminants de la mobilité résidentielle

La connaissance de la mobilité résidentielle est un enjeu important de la recherche urbaine car elle permet de comprendre comment l'Homme s'adapte aux changements de la société : qu'il s'agisse de l'activité économique, de la vie privée, des progrès techniques, ou encore des formes d'urbanisation. Cette faculté d'adaptation s'exprime souvent au travers des possibilités de choix, en l'occurrence les choix de localisation résidentielle. Le terme "choix" n'est pas neutre, et on pourrait même employer le terme "*stratégie*" [Brun et Fagnani, 1991 ; Bonvalet et Dureau, 2000 ; Bonvalet et Brun 2002]. Parler de stratégie revient à "*restituer à l'acteur sa part d'initiative dans l'élaboration de sa propre existence*" [Godar, 1990], c'est-à-dire que les individus et les ménages disposent au cours de leur vie d'une liberté d'action dans leurs pratiques résidentielles. Sans attribuer au ménage un contrôle absolu de sa destinée en fonction d'horizons fixés au départ, la notion de *stratégies*, à laquelle plusieurs auteurs font référence, lui reconnaît une part de choix : elle ouvre ainsi l'horizon des possibles qui pourraient être cernés par une vision à la fois déterministe et quelque peu floue et stochastique. Le déterminisme s'applique aux critères quantitatifs et qualitatifs que l'on sait mesurer en toute rigueur [Des Rosiers, 2001], alors que la vision stochastique pourra s'appliquer aux critères affectifs et émotionnels.

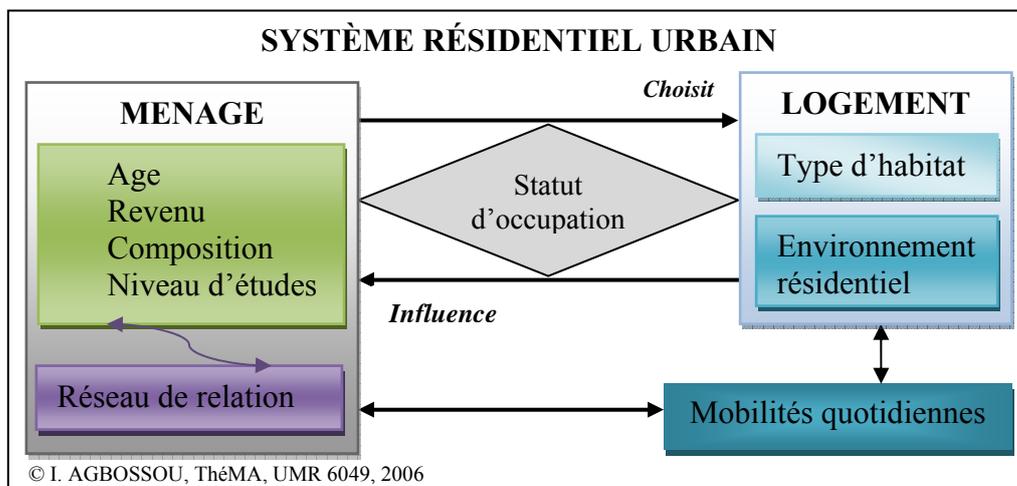


Figure 2.3 : Interactions entre les déterminants de la mobilité résidentielle

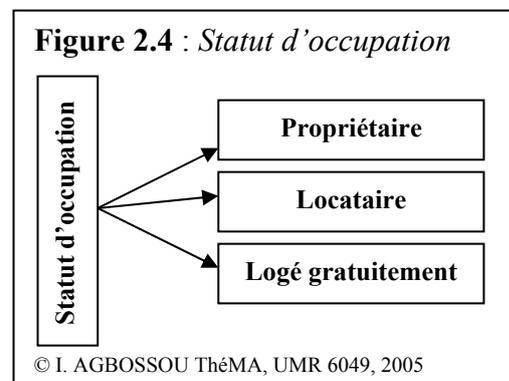
S'appuyant sur les conclusions de l'état des lieux des recherches françaises sur la mobilité résidentielle [Bonvalet et Brun 2002] et de nombreuses autres travaux à caractère international [Tannier et Vidberg, 1999, *op. cit.* ; Dureau et *al.*, 2000, etc.], il ressort six grandes catégories (organisées en deux classes) de déterminants dont la combinaison permet de mieux cerner les logiques relatives à la mobilité résidentielle pour des fins de modélisation. Il s'agit d'une part des caractéristiques propres aux ménages et d'autre part, des propriétés intrinsèques et environnementales relatives aux logements (*cf.* Figure 2.3).

2.3.1. Les éléments de caractérisation des ménages

L'effort de caractérisation des ménages dans une perspective de modélisation de la mobilité résidentielle impose de considérer quatre éléments fondamentaux. Il s'agit principalement du statut d'occupation, du revenu, de la position du ménage dans le cycle de vie et des réseaux de relations socioculturelles et familiales du ménage.

2.3.1.1. Le statut d'occupation

Rester locataire ou devenir propriétaire est un acte qui semble gouverner les choix résidentiels. Une interrogation sur la signification du statut d'occupation est nécessaire à une compréhension partielle de la pratique résidentielle. Devenir propriétaire de son logement, c'est l'horizon souhaité de presque tous les ménages, l'aboutissement d'un



parcours résidentiel. Conjugué avec la localisation (ou encore environnement résidentiel - *cf.* §2.3.2.2), le statut d'occupation constitue un fait de représentation sociale. La propriété peut conférer ainsi une position sociale que le statut professionnel ne permet toujours pas d'acquérir. L'acquisition de logement peut aussi être la seule façon de trouver un logement ou l'option la plus économique pour certaines catégories de ménages ou d'individus. Trois modalités principales (*cf.* Figure 2.4) permettent de différencier le statut d'occupation : propriétaire, locataire (privé ou social), logé gratuitement. Ces modalités ne sont pas mutuellement exclusives car un ménage possédant deux résidences (une

principale et une secondaire par exemple) peut occuper ses logements sous deux statuts distincts. Mais pour des raisons de disponibilité des données relatives à la résidence secondaire, cette dernière n'est pas prise en compte dans le modèle résidentiel des ménages que nous allons élaborer dans le cadre de ce travail. Ainsi, les trois valeurs sont donc considérées comme mutuellement exclusives.

La variable statut d'occupation désigne le statut juridique d'occupation du logement. À côté des "ménages logés gratuitement" et des agriculteurs "fermier-métayers" qui sont généralement négligés dans les études en raison de la faible proportion qu'ils représentent par rapport à l'ensemble des ménages, on distingue principalement les propriétaires des locataires. Selon le niveau de détail voulu, on peut distinguer des propriétaires en individuel (lorsqu'il s'agit d'une maison) ou en collectif (lorsqu'il s'agit d'appartement) et des locataires en individuel ou en collectif. Il est aussi d'usage de distinguer les accédants à la propriété (néopropriétaires) des autres propriétaires. De même, il est courant de distinguer les locataires du secteur social (HLM par exemple) des locataires du privé. Mais dans le cadre de notre travail de recherche, nous nous limitons aux deux principales modalités (propriétaire et locataire) de la figure 2.4 pour des raisons de représentativité et de fiabilité des données empiriques disponibles.

En ce qui concerne l'évolution des proportions des propriétaires et des locataires entre 1984 et 1996 en France, on peut noter ce qui suit : dans les aires urbaines comme au niveau national, la part des locataires a reculé, passant de 53,2% en 1984 à 49,4% en 1996 [Cavailhès et Goffette-Nagot, 2002]. L'analyse de l'évolution, entre 1992 et 1996 [Cavailhès et Goffette-Nagot, 2003], du statut d'occupation selon le type d'espace (pôles urbains et communes périurbaines) révèle que le nombre de locataires du périurbain a triplé par rapport aux pôles urbains (*cf.* Tableau 2.1). Cette forte augmentation dans les communes urbaines semble être une "réponse à des plaintes anciennes exprimées par les élus ruraux et par des responsables de l'aménagement du territoire qui regrettaient l'insuffisance du parc locatif périurbain" [Cavailhès et Goffette-Nagot, 2002, *op. cit.*]. Le nombre de propriétaires a aussi fortement augmenté dans les communes périurbaines comparativement aux pôles urbains.

Tableau 2.1 : Evolution du statut d'occupation 1992- 1996 selon le type d'espace

	Propriétaires	Locataires
Pôles urbains	6,6 %	5,6 %
Communes périurbaines	10,1 %	16,9 %

Sources : INSEE, enquêtes Logement 1992, 1996. Traitements INRA-CNRS

Ce tableau fait remarquer aussi une forte tendance à la périurbanisation. Cette conclusion se confirme davantage lorsqu'on s'intéresse à une analyse plus fine de l'évolution du statut d'occupation entre, 1984 et 1996, tenant compte de l'habitat individuel et le collectif dont les résultats sont consignés dans le tableau 2.2.

Tableau 2.2 : Evolution du statut d'occupation 1984-1996 selon le type d'espace et le type d'habitat

	Propriétaires en individuel	Propriétaires en collectif	Locataire en collectif	Locataires en individuel
Commune centre	9,2 %	24 %	7,0 %	2,6 %
Commune de banlieue	27 %	21 %	5,7 %	3,7 %
Périurbain en deçà de 20 km	32 %	NR	22 %	8,7 %
Périurbain au-delà de 20 km	30 %	NR	128 %	32 %
TOTAL	25 %	20 %	7 %	6,2 %

Sources : INSEE, enquêtes Logement 1984 et 1996. Traitements INRA-CNRS ; NR : non renseigné (effectifs faibles)

Au niveau des aires urbaines, la progression de l'effectif des propriétaires dans des immeubles collectifs (+ 20%) est presque aussi rapide que dans l'habitat individuel (+25%). Mais dans les communes centres, l'augmentation des propriétaires en immeuble collectif est beaucoup plus rapide que celle des propriétaires en maison individuelle (+24% contre 9,2%). Cependant, le nombre de propriétaires en individuel dépasse largement celui des propriétaires en collectif dans les communes périurbaines.

Les données présentées par les tableaux 2.1 et 2.2 ne tiennent pas compte de la troisième modalité (logé gratuitement) de la variable statut d'occupation en intégrant la catégorie "logé gratuitement" dans d'autres catégories non identifiées. Le tableau 2.3 donne une vision brute des statistiques relatives au statut d'occupation à niveau national depuis 1984 jusqu'en 2002 (date de la dernière enquête logement).

Tableau 2.3 : Statistiques sur la variable statut d'occupation depuis 1984 à 2002

Statut d'occupation (%)	Dates d'enquête				
	Oct. 1984	Oct. 1988	Nov. 1992	Déc. 1996	Janv. 2002
Propriétaires	50,7	53,6	53,8	54,3	56,0
Locataires	39,0	37,2	37,7	38,1	37,9
Autres dont les "logé gratuitement"	10,3	9,2	8,5	7,6	6,1
Total	100	100	100	100	100

Sources : INSEE, enquêtes Logement 1984, 1988, 1992, 1996, 2002.
Traitements INSEE (Division Logement)

Sur l'ensemble du territoire français, la proportion des individus logés à titre gracieux connaît une baisse régulière. Alors que la part des locataires enregistre une baisse relativement timide, celle des propriétaires croit de façon significative en passant de 52,2% en 1984 à 56% en 2002. Comme l'ont montré les tableaux précédents, la majorité des propriétaires se concentre dans les communes périurbaines.

L'agglomération bisontine ne fait pas exception à cette logique de périurbanisation. En effet, même si en 1999 la CAGB (Communauté d'Agglomération du Grand Besançon) comptait environ 42% de propriétaires contre 58% de locataires en résidence principale, la part des propriétaires a augmenté de 0,5 point sur une période de 9 ans [AUDAB, 2002]. Et les $\frac{3}{4}$ des propriétaires se trouvent en première couronne. De plus, 66% des logements construits après 1990 dans la première couronne sont occupés par des propriétaires, alors que dans la ville centre leur part n'est que de 24%.

2.3.1.2. La catégorie socioprofessionnelle, un indicateur illusoire du revenu et du niveau d'études

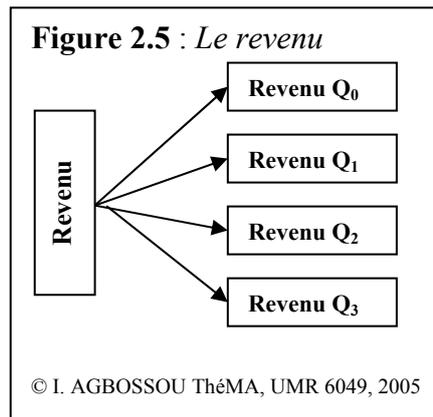
Nombre d'études ont montré que le comportement migratoire des individus (niveau de mobilité et distances parcourues par exemple) varie significativement en fonction de leur catégorie socioprofessionnelle. Certaines catégories socioprofessionnelles se caractérisent par un niveau de mobilité élevé associé à des migrations à longue distance en moyenne (les cadres surtout). D'autres au contraire changent peu souvent de logement et parcourent des distances courtes (les exploitants agricoles). Un changement de logement peut être aussi motivé par un changement d'emploi (il peut d'ailleurs aussi arriver que ce soit le changement d'emploi qui soit la conséquence d'un changement de logement, lui même dû

à un autre motif, familial par exemple), cette mobilité géographique associée à la mobilité professionnelle des individus étant en général interurbaine, sur des distances relativement longues. Une catégorie socioprofessionnelle est la traduction du statut socioéconomique qui lui-même peut être différencié par deux variables principales : le niveau de revenu et le niveau d'études. La nomenclature des professions et des catégories socioprofessionnelles (CSP) est utilisée par l'INSEE depuis le recensement de 1982. Les niveaux les plus agrégés, ceux des catégories socioprofessionnelles (niveaux en 8, 24 et 42 postes), sont un regroupement direct du niveau le plus fin. En considérant la nomenclature à huit niveaux, six groupes permettent de ventiler les personnes ayant une activité professionnelle ; les deux autres concernent les retraités et les "autres personnes sans activité professionnelle" comprenant les chômeurs n'ayant jamais travaillé, les militaires du contingent, les élèves et les étudiants. Ainsi, il est d'usage de distinguer les catégories suivantes : les agriculteurs, les artisans, commerçants, chefs d'entreprises, les cadres (professions intellectuelles supérieures), les professions intermédiaires, les employés, les ouvriers, les retraités, et les "sans activité professionnelle".

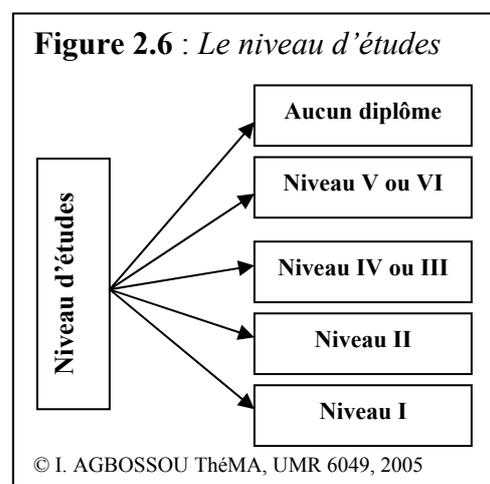
Cependant, cette nomenclature ne fait pas l'unanimité au niveau des différentes études statistiques. En effet, en fonction des objectifs de l'étude, elle est utilisée de façon partielle, agrégée ou désagrégée. Ainsi certaines catégories peuvent être éclatées en sous catégories. Par exemple il est fréquent de distinguer les ouvriers qualifiés des ouvriers non qualifiés. De même, il n'est pas rare de distinguer les exploitants agricoles des salariés agricoles. La prise en compte des CSP s'avère très utile lorsque l'on s'intéresse exclusivement à la mobilité résidentielle liée à la profession des ménages. En revanche cette variable devient moins expressive lorsqu'il s'agit de la modélisation du choix de la localisation résidentielle des ménages. Dans ce cas, les variables les plus importantes sont le revenu et le niveau d'étude du ménage (au travers de la personne de référence). En effet, un ouvrier qui possède une ancienneté relativement importante dans sa profession peut avoir un revenu plus élevé qu'un cadre en début de carrière. Le niveau d'étude intervient alors comme variable d'ajustement.

Si le changement de résidence s'accompagne aussi d'un changement de profession, il peut se traduire par une progression ou une régression professionnelle. De ce fait, l'individu change également de CSP. Plusieurs travaux [Adrieux, 1989 ; Bastide et Girard, 1974 ; Courgeau et Pumain, 1984 ; Pumain, 1986 ; Riandey, 1983] consacrés à l'étude de ce phénomène ont montré la corrélation entre la reconversion professionnelle et la mobilité résidentielle.

Pour une meilleure prise en compte de la variable ‘‘Revenu’’, nous choisissons de discrétiser cette variable en quatre classes en termes de niveau de revenu (Q_i avec $0 \leq i \leq 3$). Pour ce faire, il est possible de procéder par une approche basée sur la théorie des sous-ensembles flous [Tannier et Houot, 2003; Nicot, 2007, *op. cit.*]. Mais, à l’instar de l’INSEE, nous utilisons la méthode des quartiles (*cf.* Figure



2.5). En effet, l’INSEE utilise une approche basée sur la méthode des déciles appliquée



aux revenus fiscaux déclarés par les ménages à la DGI (Direction Générale des Impôts). La deuxième variable qui va de paire avec le revenu, en substitution aux CSP, est le niveau d'études (*cf.* Figure 2.6). Classiquement, on prend comme référence les diplômes académiques. En distinguant six niveaux d'études (niveau VI : sorties du 1er cycle du second degré et des formations préprofessionnelles ; niveau V :

sorties des classes de 3^{ème}, des classes de second cycle avant la terminale et des formations professionnelles de type CAP-BEP ; niveau IV : sorties avec le baccalauréat ou avant le DEUG ; niveau III : sorties avec un diplôme à bac + 2 ; le niveau II correspond à un diplôme du second cycle universitaire et le niveau I, un diplôme du troisième cycle universitaire) et un septième niveau pour les individus qui n'en ont aucun. En somme, le statut social que l'on peut préférer à la catégorie socioprofessionnelle est fonction du revenu et du niveau d'étude de la personne de référence du ménage.

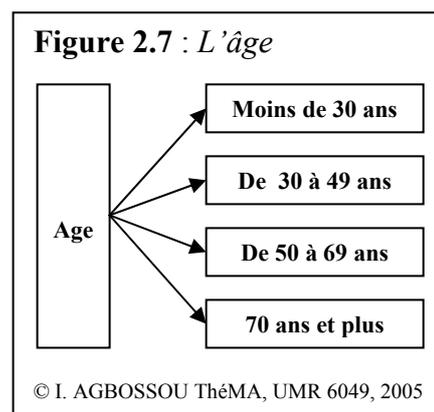
2.3.1.3. Le cycle de vie

P-H. Rossi a démontré que ‘*la fonction principale de la mobilité est le processus par lequel une famille ajuste son logement à ses besoins qui sont générés par les variations de la composition familiale accompagnant le cycle de vie*’ [Rossi, 1955]. Cette conclusion corrobore le fait que la mobilité résidentielle dépend aussi fortement des événements familiaux et de leur fréquence. Comme événements principaux on peut citer : les

naissances, la décohabitation (le départ de chez les parents), la mise en union, les séparations, la retraite professionnelle et le décès.

Le cycle de vie des ménages peut être appréhendé par deux principales variables non mutuellement exclusives : l'âge de la personne de référence et la composition du ménage. En effet, la variable "âge" permet de situer le ménage dans une position du cycle de vie afin de lui associer les événements familiaux qui sont potentiellement susceptibles de survenir dans la vie d'un ménage à partir de cette position. La variable composition du ménage vient renforcer la précision de ces événements familiaux.

En ce qui concerne l'âge de la personne de référence, la plupart des études considèrent classiquement quatre tranches d'âge (cf. Figure 2.7). Les bornes choisies pour les tranches d'âges ne sont pas arbitraires. En effet, elles présentent une forte adéquation entre les différentes positions du cycle de vie où surviennent les événements familiaux comme la mise en union, le départ de chez les parents, les naissances [Robert-



Bobée, 2002]. L'âge limite ou maximal (âge où l'évènement décès est certain) au-delà de 70 ans est la valeur de l'espérance de vie à la naissance. Le tableau 2.4 présente l'espérance de vie du Doubs et de la Franche-Comté en 1990 et 2000 en comparaison à l'espérance de vie au niveau national (France métropolitaine).

Tableau 2.4 : Espérance de vie

	Espérance de vie à la naissance en 1990			Espérance de vie à la naissance en 2000		
	Doubs	Franche-Comté	France métropolitaine	Doubs	Franche-Comté	France métropolitaine
Homme	73,2	73,3	72,9	75,6	75,5	75,2
Femme	80,9	80,8	81,0	83,0	82,8	82,7

Sources : INSEE – Etat civil – Estimation localisée de population

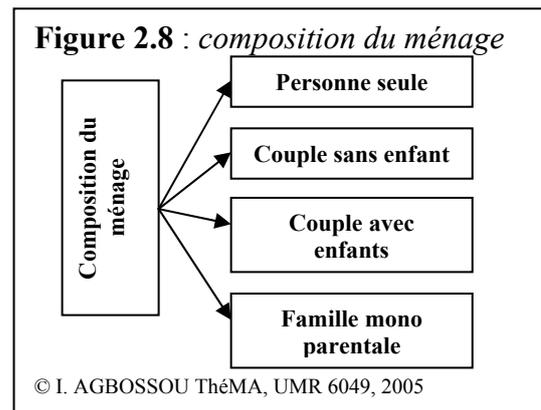
Si les tendances démographiques se maintiennent (vieillesse de la population et plus faible fécondité) et l'évolution des modes de cohabitation se confirme, le nombre de ménages de la CAGB pourrait continuer de croître mais à un rythme ralenti : moins de 1% par an de 1999 à 2015, contre 1,7% durant la période de 1990-1999. Le tableau 4.5 résume cette projection.

Tableau 2.5 : Âge de la personne de référence des ménages à l'horizon 2015 dans la CAGB

	Projection			Evolution annuelle moyenne 1999/2005 (%)
	RP 1999	2005	2015	
Moins de 30 ans	15 830	15 479	15 399	-0,17
De 30 à 54 ans	34 053	33998	34 656	0,11
De 55 à 74 ans	16 601	18 879	23 400	2,17
Plus de 75 ans	7 228	9 473	12 198	3,32
Tous âges	73 712	77 830	85 653	0,94

Sources : INSEE – RP99 et projections Omphale

En ce qui concerne la composition du ménage, deux approches sont possibles : une première approche permet de distinguer le nombre d'enfants du ménage sur une échelle de 1 à 5 et plus. La seconde approche différencie simplement les ménages avec enfants des ménages sans enfant. En fonction du niveau de détail qu'on souhaite atteindre



dans la modélisation comportementale des ménages, on aura la préférence à l'une ou l'autre des deux approches. En cas d'utilisation de la seconde approche, on pourrait prendre la moyenne d'enfants par ménage comme nombre d'enfants des couples avec enfants. On peut aussi utiliser le taux de natalité comme base de calcul. Mais dans le cadre de notre recherche, nous adoptons le découpage en quatre modalités possibles (cf. Figure 2.8).

La prise en compte de l'apparition des évènements familiaux en termes d'estimation des comportements de mise en couple, ruptures des unions, naissance des enfants se fera à partir des conclusions et résultats du modèle de microsimulation des comportements démographiques DESTINIE [INSEE, 1999 ; Robert-Bobée, 2002, *op. cit.*] dans le prochain chapitre.

2.3.1.4. Les réseaux de relations socioculturelles et familiales

L'implantation géographique n'obéit pas seulement aux règles économiques ; d'autres mécanismes sont aussi à l'œuvre : les réseaux de relation ont souvent une influence déterminante dans le choix de localisation résidentielle. La prise en compte des réseaux de relation et des groupes familiaux, permettra de mieux comprendre les trajectoires

résidentielles ainsi que les choix opérés par les ménages. De même, elle pourrait expliquer certaines résistances aux grandes tendances comme l'accès à la propriété. Les critères exprimant l'existence de réseaux de relation sont la cohabitation à l'échelle de la cité (HLM par exemple), du quartier ou de la copropriété, la colocation, la résidence secondaire (que nous ne traitons pas dans le cadre de ce travail de thèse), l'attachement affectif au lieu (identité spatiale) et les relations sociales. Ces critères ne sont pas stables dans le temps et peuvent aussi perdre de leur consistance. Aussi, l'influence que peuvent avoir les réseaux de relation sur le choix résidentiel d'un ménage dépend de l'importance que ce dernier accorde à un tel réseau s'il en existe. Cette influence peut se mesurer de la même façon que le processus de formation d'opinion [Alexandre, 1999 ; Alexandre, 2003 ; Bonvalet et Dureau, 2000, *op. cit.* ; Frankhauser et *al.*, 1995 ; Moscovici, 1984 ; Moles et Rohmer, 1977 ; Schweitzer, 2003]. En effet, le lien (affinité culturelle, familiale, etc.) entre un ménage et les autres ménages du réseau social peut s'effriter ou se consolider davantage au fil du temps ; et de ce fait aura une certaine influence sur le choix résidentiel du ménage. Mais ce processus est aussi conditionné par l'opinion que se fait le ménage en question, sur sa satisfaction relative due à la présence des autres ménages du réseau. Cette phase de la modélisation s'appuiera également sur les travaux relatifs à l'engagement [Azdia et *al.*, 2002 ; Girandola et Roussiau, 2003], l'autonomie et l'indépendance sociale [Carabela et *al.*, 2004] et les réseaux de confiance [Melaye et Demazeau 2004]. Dans l'hypothèse qu'il existe un réseau pouvant influencer le choix résidentiel d'un ménage, et selon ses caractéristiques, ce dernier se forge une opinion sur l'importance du réseau en tenant compte de la distance spatiale entre lui-même et les autres ménages de son réseau social, de son expérience relativement à sa position dans le cycle de vie en termes de mobilité résidentielle et de la possibilité d'un éventuel changement de résidence de la part des autres ménages.

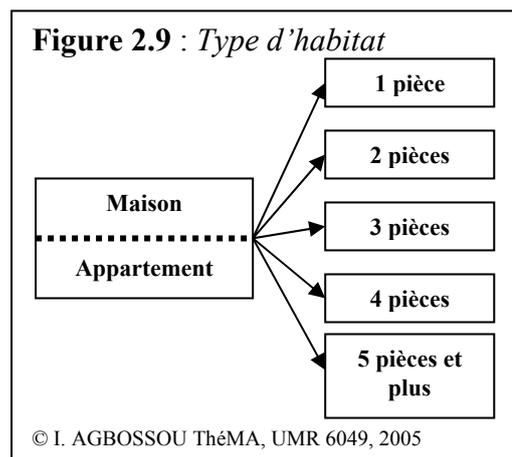
2.3.2. Les déterminants relatifs aux logements

Deux déterminants principaux permettent de caractériser un logement : le type d'habitat dont il fait partie et la qualité de l'environnement résidentiel.

2.3.2.1. Le type d'habitat

L'habitat désigne le cadre et les conditions de vie d'une population en général, et en particulier le mode de groupement des établissements humains. En milieu urbain il désigne la part du tissu bâti spécialement affecté au logement des habitations. La fonction de résidence revêt des formes extérieures, une structure interne et des modes d'occupation du sol extrêmement variés selon les régions, les villes, les quartiers. Aux formes d'habitat en dur, qui serviront de référence dans notre thèse, s'opposent celles, encore très répandues dans le monde, de l'habitat précaire de grands secteurs d'Afrique noire, et de l'habitat des populations très pauvres, spontanément formé en marge de nombreuses grandes villes dans les pays en voie de développement. Ainsi la morphologie et l'évolution de l'habitat reflètent celles des mentalités, des cultures, des moyens d'existence et des modes de vie.

Dans notre cas, nous distinguons deux types d'habitat : la maison individuelle et l'appartement (cf. Figure 2.9). Ce dernier est un logement inclus dans un immeuble qui en compte plusieurs. Un appartement est généralement situé sur un seul niveau. On parle improprement de logement collectif ou d'habitat collectif [Merlin et Choay, 2000]. En fait, tout habitat est collectif et tout logement



est individuel à l'échelle du ménage, sauf cas de cohabitation de plusieurs ménages dans un même logement (situation devenue très rare en France). L'appartement s'oppose à la maison individuelle. La distinction n'est pas toujours évidente, surtout dans les constructions récentes (habitat dit intermédiaire) et parfois dans les petites villes (habitat continu bas ou mitoyen). Cette distinction est cependant importante au plan juridique (règles d'urbanisme) et au plan idéologique et du mode de vie. Du point de vue de l'urbanisme, l'appartement consomme peu d'espace et permet donc une concentration dans les zones desservies par les transports en commun. Permettant des densités élevées, il rend moins coûteuse la réalisation des infrastructures et en favorise un bon niveau d'équipement.

Nous supposons que le type d'habitat peut donc être identifié par deux variables mutuellement exclusives : la maison et l'appartement. Notons que ces deux variables

peuvent ne plus être mutuellement exclusives lorsqu'on s'intéresse à la fois aux résidences principales et aux résidences secondaires. Classiquement, ces deux variables se mesurent (la taille du logement) en surface habitable ou en nombre de pièces. En France, la surface est la superficie occupée par le plancher, murs et gaines techniques non comprises. Dans d'autres pays, on ne compte que la superficie des pièces principales. La considération du nombre de pièces suppose des conventions : par exemple en France, la cuisine ne compte pas comme pièce principale, sauf si elle dépasse 12m², ce qui est le cas de nombreux logements périurbains et ruraux où la cuisine tient lieu de salle de séjour. La plupart des travaux [Lelièvre et Lévy-Vroelant, 1992, *op. cit.*] consultés mesurent la taille des logements en nombre de pièces, car cette donnée est relativement plus facile à obtenir via les enquêtes auprès des ménages et permet une approximation de la taille du ménage. Par exemple, la taille des logements est mesurée en nombre de pièces dans la CAGB [AUDAB, 2005]. Ainsi, en mai 2005, près de 54% des locataires du parc privé de la CAGB vivent dans une ou deux pièces, contre 23% des locataires HLM et 5% des propriétaires. A l'inverse, 52% des propriétaires occupent un logement de 5 pièces ou plus contre 12% des locataires HLM et moins de 9% des locataires du parc privé. Les logements et les ménages sont donc globalement plus petits chez les locataires que chez les propriétaires. De plus, à nombre égal d'occupants, les propriétaires disposent de plus de pièces que les locataires. Les propriétaires vivant seuls ont deux fois plus d'espace (3,7 pièces) que les locataires du parc privé. Ces derniers ne sont que 53,9% à vivre avec plus d'une pièce par personne (contre 87,7% pour les propriétaires). Plus de 40% disposent exactement d'une pièce par personne. Les locataires du parc HLM sont plus de 10% à disposer de moins d'une pièce par personne. La connaissance de l'évolution des constructions nouvelles est aussi un indicateur important pour la modélisation de la périurbanisation. Le tableau 2.6 présente le volume de logements construits entre 1990 et 2003 dans la CAGB.

Tableau 2.6 : *Volume des constructions neuves entre 1990 et 2003 dans la CAGB*

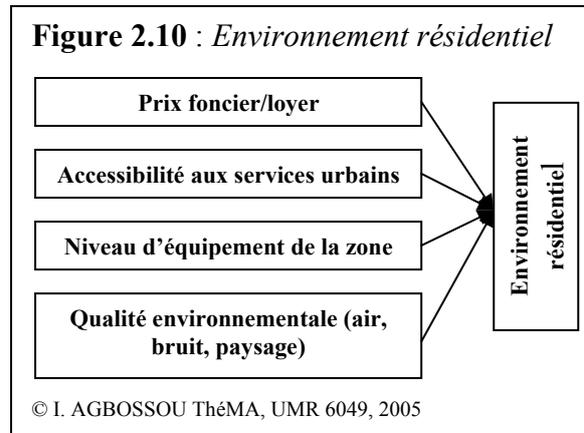
		Maisons	Appartements	Total
1990 à 1998	Besançon	1 016	9 883	10 899
	Périphérie	2 260	531	2 791
	CAGB	3 276	10 414	13 690
1999 à 2003	Besançon	332	2 043	2 375
	Périphérie	1 878	279	2 157
	CAGB	2 210	2 322	4 532

Sources : Direction Régionale de l'Équipement

2.3.2.2. L'environnement résidentiel

De multiples configurations et critères sont susceptibles d'intervenir dans les choix de localisation et de ce fait, conditionnent les stratégies résidentielles. En effet, les choix de localisation du logement font aussi référence aux structures urbaines, à la distribution du parc de logement relativement aux autres

composantes de la ville : emplois, commerces, équipements, espaces verts etc. Comme variables de différenciation (*cf.* Figure 2.10), on peut distinguer le prix ou le loyer, la qualité de l'environnement local (niveau de risque, gêne du bruit, qualité paysagère, tranquillité du voisinage...), l'accessibilité aux services et aux équipements urbains et la proximité des services de première nécessité. Chaque variable fera l'objet d'une modélisation particulière ; et l'ensemble de ces sous modèles sera ensuite intégré dans un modèle plus global pour caractériser l'environnement résidentiel. Il existe doré et déjà une formalisation de la rente foncière [Caruso 2003, *op. cit.*, Cavailhès et al., 2004 ; Thériault, 2005] adaptée à la modélisation urbaine. L'accessibilité est une notion plus complexe et à facettes multiples qui joue un rôle capital dans l'évolution des villes [Cavailhès et Goffette-Nagot, 2002, *op. cit.*]. Par exemple, ce sont des différentiels d'accessibilité qui permettent d'expliquer les variations spatiales de la rente foncière (concurrence pour les localisations centrales qui se traduit dans le prix des terrains et des espaces construits - densité d'occupation du sol -). Pour les besoins de la modélisation, l'accessibilité est souvent définie comme un potentiel d'interaction qui découle d'une localisation en rapport avec la distribution des opportunités (services et aménités urbaines) sur le territoire et la structure des réseaux de communication et/ou de transport permettant de réaliser les échanges, tout en tenant compte des contraintes liées à la circulation (ce que certains auteurs appellent impédance). Le niveau d'équipement des zones tient compte des diverses infrastructures nécessaires au maintien et à l'évolution des fonctions urbaines. La qualité environnementale intègre le niveau de pollution, la gêne du bruit [Houot, 1999 ; Tannier et Houot, 2003, *op. cit.*] ainsi que la qualité



paysagère. Le niveau d'insécurité devra tenir compte des risques naturels, technologiques et sociaux.

La mobilité résidentielle est un sujet complexe et vaste. Il est complexe car il consiste non seulement à étudier les trajectoires géographiques des individus ou les mutations du parc de logements seulement, mais aussi l'évolution du couple ménage-logement. Lorsque les économistes se penchent sur la question de la mobilité des ménages, ils privilégient des angles de recherche qui peuvent être très différents. Ils s'intéressent essentiellement à trois associations : mobilité et travail (taux de chômage, proximité du lieu de travail, etc.), mobilité et famille (décohabitation, nombre d'enfants, etc.) et mobilité et marché du logement (rôle de la construction neuve, des aides publiques au logement, etc.).

Ce chapitre dont le contenu est principalement axé sur une revue de la littérature des dynamiques de la mobilité résidentielle a permis d'esquisser une typologie des ménages. Son but est de donner un aperçu succinct des briques élémentaires nécessaires à la compréhension des choix résidentiels dans une perspective de modélisation. Aussi constitue-t-il à la fois un préalable et le socle empirique des diverses hypothèses sous-jacentes à la transcription des connaissances déjà acquises et validées, en matière de mobilité résidentielle, sous forme de règles formelles.

Bibliographie référencée

- [Allen et Sechet, 1988] B. Allen, P. Sechet. Les processus d'installation dans l'habitat. Paris, 1988
- [Anas, 1982] A. Anas. Residential location markets and urban transportation: economic theory, econometrics and Policy analysis with discrete choice models. New York Academic Press, 1982
- [Arnott, 1985] R.J. Arnott. Hopsim: A housing policy simulation model (mimeo), Kingston, Ontario: Queen's University, 1985
- [AUDAB, 2005] AUDAB. Tableau de bord de l'agglomération bisontine. Chiffres clés. Communauté d'Agglomération du Grand Besançon, 2005
- [Bonetti, 1994] M. Bonetti. Habiter : le bricolage imaginaire de l'espace. Collections Reconnaissances. Editions Hommes et Perspectives. Paris, 1994
- [Bonvalet, 1987] C. Bonvalet. Les parisiens dans leur maturité : origine, parcours, intégration. In Population n°3, 1987
- [Bonvalet et Gotman, 1993] C. Bonvalet, A. Gotman. Le logement, une affaire de famille. Editions L'Harmattan, 1993
- [Cavailhès et al., 2004] J. Cavailhès, P. Frankhauser, I. Thomas. Where Alonso meets Sierpinski : An urban economic model of a fractal metropolitan area. In Environment and Planning A, Vol. 36, 2004
- [Chamboredon et Lemaire, 1970] J-C. Chamboredon, M. Lemaire. Proximité spatiale et distance sociale. In Revue Française de Sociologie n°1 Paris, 1970
- [Chombart De Lauwe, 1963] H. Chombart De Lauwe. La vie sociale dans les grands ensembles d'habitation. In Logement n°150, 1963
- [Clark et Onaka, 1983] W.A.V. Clark, J.L. Onaka. Life cycle and housing adjustment as explanations of residential mobility. In Urban Studies n°20, 1983
- [Courgeau, 1984] D. Courgeau. Relations entre cycle de vie et migrations. In Population n°3, 1984
- [Courgeau et Pumain, 1984] D. Courgeau, D. Pumain. Baisse de la mobilité résidentielle. In Population et société n°179, 1984
- [Courgeau, 1988] D. Courgeau. Méthodes de mesures de la mobilité spatiale. INED, Paris, 1988
- [Cribier, 1989] F. Cribier. Itinéraires résidentiels et stratégies d'une génération de parisiens à deux périodes de leur vie. In Les Annales de la Recherche Urbaine n°41, 1989
- [Dureau et al., 2000] F. Dureau et alii. Métropoles en mouvement. Une comparaison internationale, Paris 2000.
- [Filippi, 1993] B. Filippi. Les enquêtes-mobilité : potentialités et enjeux pour la connaissance du fonctionnement des marchés locaux de l'habitat. In Actes et entretiens de l'Habitat de Nancy, 1993

[Filippi, 1997] B. Filippi. Mobilité résidentielle, chaînes de vacance et approches systémiques des marchés locaux de l'habitat. Comment observer et modéliser ? *In* Comprendre les marchés locaux du logement. Edition L'Harmattan, Collections Villes et entreprises, Paris, 1997

[Gerand, 1967] R-H. Gerand. Les origines du logement social en France, Paris, Edition Ouvrière, 1967

[Ginsberg, 1979] R. Ginsberg. Timing and Duration Effect in Residential History and Other Longitudinal Data. *In* Regional Science and Urban Economics n°9, 1979

[Goodman, 1990] A.C. Goodman. Demographics of Individual Housing Demand. *In* Regional Science and Urban Economics, n°20, 1990

[Houot, 1999] H. Houot. Approche géographique des nuisances sonores urbaines. Méthodologie d'aide à la prise en compte des nuisances sonores en aménagement urbain. Application à la ville de Besançon. Thèse de doctorat de l'Université de Franche-Comté, 1999

[Lars, 1992] L. Lars. Période post-parentale : déménager ou pas ? *In* La ville en mouvement : habitat et habitants. Editions L'Harmattan, Paris, 1992

[Lelièvre et Lévy-Vroelant, 1992] E. Lelièvre, C. Lévy-Vroelant. La ville en mouvement : habitat et habitants. Editions L'Harmattan, Paris, 1992

[Levy, 1995] J-P. Levy. Les dynamiques socio-spatiales des marchés immobiliers. *In* Revue d'Economie Régionale et Urbaine n°3, 1995

[Levy et Piazzoni, 1994] JP. Levy, F. Piazzoni. Qui habite quoi ? Composantes et dynamiques socio-spatiales du marché de l'habitat à Pantin. Rapport pour la ville de Pantin, 1994

[Lily et al., 1992] Van N. Lily, H. Pieter, D. Frans. Influence du divorce sur la trajectoire résidentielle. *In* La ville en mouvement : habitat et habitants. Editions L'Harmattan, Paris, 1992

[Louvot, 1992] C. Louvot. De la location à la propriété : le parc de logements se redistribue. *In* Economie et statistique n°251, 1992

[Lugassy, 1985] F. Lugassy. Les significations psychosociales du logement. Thèse d'État, Université de Nancy, 1985

[Maleyre, 1994] I. Maleyre. Logement et demande de biens à caractéristiques multiples : vers un renouvellement des modèles d'équilibre spatial urbain ? Application à Abidjan. Thèse de doctorat de sciences économiques, Université Paris XV, 1994

[Micoud, 1974] A. Micoud. Le fonctionnement de la mobilité résidentielle intra-urbaine, application à l'agglomération stéphanoise, Saint-Etienne, CRESAL, 1974

[Nicot, 2007] B. Nicot. Comportements spatiaux, critères de choix et imprécision. Document de travail ECDESUP, Laboratoire ThéMA, Besançon, 2007

[Orfeuil, 1999] J-P. Orfeuil. La mobilité, révélatrice du nomadisme ou de la volonté d'ancrage ? Edition CERTU, 1999

[Palmade, 1989] J. Palmade. Système idéologique et symbolique de l'habiter. Thèse d'État, Université de Toulouse, 1989

[Petonnet, 1982] C. Petonnet. Espace habité, ethnologie des banlieues. Paris, Galilée, 1982

[Vandekerckove, 1995] L. Vandekerckove. Dépenses de logement et comportements résidentiels en 1988 et 1992. In *Consommation et modes de vie n°77-78*, INSEE, Paris, 1995

[Vidberg et Tannier, 1999] S. Vidberg, C. Tannier. Urban location strategies. Some elements for a best understanding. Working paper, Université de Franche-Comté, ThéMA, 1999.

[Soulignac, 1995] F. Soulignac. Construction neuve et déménagements en chaîne, Paris, IAURIF, 1995

[Tannier et Houot, 2003] C. Tannier, H. Houot. SimNoise: Simulating the Impact of Noise Annoyance on Intra-urban Residential Migration. ThéMA, Université de Franche-Comté, Besançon 2003

[Vincent, 1986] M. Vincent. La formation du prix du logement. Editions Economica, Paris, 1986

[Thériault, 2005] M. Thériault. Définition et mesure de l'accessibilité aux services urbains: comportements de mobilité, perceptions et impact sur les valeurs résidentielles. Présentation ThéoQuant, Université de Franche-Comté, Besançon, 26 janvier 2005

[Weidlich et Haag, 1988] W. Weidlich, G. Haag. *Interregional Migration. Dynamic Theory and Comparative Analysis*; Springer Verlag, Berlin, 1988.

3

PROBLÉMATIQUES ET PREMIÈRES APPROCHES DE MODÉLISATIONS ET DE SIMULATIONS URBAINES

Les phénomènes naturels, enchaînés les uns aux autres, forment un réseau dont les parties adhèrent entre elles, mais non de la même manière, ni au même degré.

A. Cournot

En géographie, la modélisation et la simulation constituent des voies de recherche de plus en plus empruntées pour représenter et reproduire une partie de la réalité et ainsi, aider à mieux comprendre le fonctionnement de phénomènes spatio-temporels. Par exemple, l'analyse d'un espace géographique passe par l'identification des éléments les plus pertinents de ses entités spatiales et des interactions de ces dernières avec d'autres entités sociogéographiques. Dans ce genre d'exercice constitutif, le choix conceptuel du "*penser la ville*" se fait au regard de théories urbaines. Celles-ci accordent une place prépondérante à la dimension spatiale et "*posent le fait urbain comme une façon particulière d'organiser l'espace, d'habiter, d'exploiter et de contrôler le territoire*" [Pumain et Robic, 1996].

La démarche que nous empruntons dans le cadre de ce travail s'inscrit entièrement dans ces théories. Elle permet donc de situer notre approche dans le contexte conceptuel et scientifique en regard des nouvelles méthodes et des outils de modélisation et de simulation urbaine utilisés dans le cadre de l'aménagement du territoire.

3.1. Problématiques liées à la modélisation des dynamiques urbaines

La prise de conscience des effets néfastes de l'utilisation non maîtrisée de l'espace et l'émergence du concept de développement durable ont fait évoluer l'appréhension des problématiques urbaines. Désormais les aménageurs doivent reconsidérer ces problèmes dans toute leur globalité. Il est alors devenu évident, pour les acteurs de la gestion du territoire, que la maîtrise de cette tâche complexe [Laaribi, 2000] nécessite l'utilisation d'une quantité d'informations plus grande sur le territoire ainsi que des méthodes et outils d'analyse, de modélisation et d'aide à la décision plus puissants et mieux adaptés. Au nombre des préoccupations de l'aménagement du territoire, figurent les problématiques de mobilité urbaine [Derycke et *al.*, 1996 ; Sanders, 2006 ; Pumain et Mattei, 1998, 2003 ; Pumain et Saint-Julien, 1997 ; Pumain et Godard, 1996] et particulièrement, la mobilité résidentielle [Baumont, 1993 ; Weber, 1999 ; Frankhauser et *al.*, 1998 ; Frankhauser et *al.*, 1995 ; Frankhauser et *al.*, 1997], objet de notre recherche.

En effet, les questions de mobilité résidentielle se posent en termes de choix du ou des meilleur(s) emplacement(s) pour l'installation résidentielle pour un ménage selon un arbitrage relatif à l'importance des caractéristiques des sites en concurrence. Joerin et Bordin notent à ce sujet que l'étude de la localisation amène à prendre une décision très importante par le fait qu'elle étendra ses effets à long terme [Joerin, 1995 ; Bordin, 2002] autant pour la collectivité que pour les individus. Il est donc primordial que les méthodes choisies pour modéliser cette question soient rigoureuses et fiables.

La ville et les interactions [Frankhauser, 1993, 1996 ; Frankhauser et *al.*, 1995, *op. cit.* ; Pumain et Saint-Julien, 2001] qui s'y observent constituent un système éminemment complexe. On peut étudier ce dernier à une échelle microscopique selon le comportement de ses habitants, des acteurs individuels ou collectifs, ou bien à un niveau macroscopique en s'interrogeant par exemple sur les raisons de sa croissance ou de son déclin. De ce fait, la nécessité de maîtriser les pratiques de mobilités urbaines devient un enjeu important de la recherche urbaine appliquée. Mais ce besoin en termes de connaissances varie au cours du temps, en fonction de l'émergence de nouveaux problèmes et de nouvelles pratiques urbaines. Il s'agit maintenant essentiellement de pouvoir gérer au mieux l'aménagement urbain et cerner les liens d'articulation entre échelles microscopiques et macroscopiques tout en favorisant la mobilité des ménages

et des entreprises à l'intérieur des agglomérations et l'accès aux services et aux équipements.

Pour parvenir à cette fin, la loi relative à la Solidarité et au Renouvellement Urbain dite loi SRU propose aux collectivités locales d'harmoniser, à l'échelle des aires urbaines, leurs politiques d'aménagement et de développement grâce aux schémas de cohérence territoriaux (SCoT). Dans le but de construire un projet d'aménagement conforme aux directives de la loi SRU répondant aux objectifs du développement durable, il pourrait être utile de développer des scénarios prospectifs visant à simuler diverses dynamiques urbaines. Ainsi, des simulations assez vastes et variées des idées de développement urbain devront être testées afin de mettre en évidence les conséquences d'une politique spatiale et d'un aménagement stratégique. Les résultats de simulation aideront les décideurs dans leurs choix. Ceci suppose que les collectivités doivent se doter d'un outil intégré d'aide à la décision afin de simuler les impacts des projets d'aménagement. Mais la modélisation d'un système complexe comme la ville est un exercice difficile et épineux. Cette difficulté de modélisation peut être attribuée à un certain nombre de contraintes.

1- **La prise en compte des échelles d'articulation** : il est nécessaire de pouvoir distinguer les niveaux d'agrégation adaptés dans l'analyse de phénomènes se déroulant sur plusieurs niveaux d'organisation. Par exemple, il est très difficile (voire impossible dans une démarche non asynchrone) de relier la taille d'un effectif aux prises de décisions par les individus d'un système [Winder, 1999]. On peut dire que ces niveaux d'analyse sont "rigides" entre eux puisqu'il n'est pas aisé de faire correspondre des comportements observés à l'échelle microscopique à des variables globales mesurées à l'échelle macroscopique. Or la compréhension des structures spatiales nécessite une analyse systématique et complète du domaine de validité des paramètres afin d'évaluer l'impact des différents processus sur les structures émergentes et mesurées au niveau globale [Cocu et Caruso, 2002].

2- **Le réalisme des paramètres** : pour des raisons d'utilisation pratique et de prise en compte effective de la réalité, le modélisateur introduit dans les équations un grand nombre de paramètres relativement difficile à estimer. Ce qui affaiblit le degré de prédiction du modèle.

3- **Les données qualitatives** : de par leur nature même, et en raison du point précédent (c'est-à-dire la sélectivité des variables et paramètres indispensables à l'interprétation et au calibrage du modèle), il devient nécessaire d'intégrer des variables qualitatives dans

les modèles, même si on n'a pas toujours la possibilité de réaliser des *scénarii* de simulation pour faire varier leurs valeurs extrêmes afin d'appréhender l'ensemble des trajectoires possibles du modèle. Toutefois, les acquis de la théorie des sous ensembles flous [Rolland-May, 2000 ; Tannier, 2000 ; Nicot, 2007, *op. cit.*] permettent de contourner cette contrainte.

4- La prise en compte de la *dimension cognitive* : la représentation du comportement humain, des connaissances explicites et/ou implicites ainsi que la subjectivité relative à l'objet d'étude aussi bien au plan socio-économique qu'au plan spatio-temporel s'avère une contrainte *sine qua non* pour une véritable simulation de la dynamique urbaine. Les formalismes issus de l'intelligence artificielle (IA) de l'intelligence artificielle distribuée (IAD) constituent d'ores et déjà des outils [Frankhauser et *al.*, 1998 ; Dauce, 2002] mieux adaptés à ce type de modélisation.

Fort de ces contraintes, et s'appuyant sur quelques travaux fondateurs de modélisation et de simulation des phénomènes urbains [Antoni, 2003 ; Caruso, 2003, *op. cit.* ; Cocu et Caruso 2002, *op. cit.* ; Frankhauser et *al.*, 1995, *op. cit.* ; Frankhauser et *al.*, 1997, *op. cit.* ; Frankhauser et *al.*, 1998, *op. cit.* ; Treuil et *al.*, 2001 ; Vanbergue, 2003 ; Weber, 1999, *op. cit.* ; etc.], nous proposons dans cette thèse de réaliser un modèle de simulation de la mobilité résidentielle. ***Ce modèle sera issu du couplage d'un modèle multi agent et d'un modèle d'automate cellulaire*** (*cf.* Chapitre 6).

En effet, les systèmes multi agent apportent une solution radicalement nouvelle [Drogoul et *al.*, 2004 ; Guessoum, 2002] au concept même de modèle et de simulation dans les sciences humaines et sociales. En l'occurrence dans les applications géographiques et d'aménagement du territoire, ils offrent la possibilité de représenter directement les individus ou groupes d'individus (agents), leur comportement dans le temps et leur interaction à l'échelle spatiale (par le biais des automates cellulaires) et organisationnelle.

3.2. La ville et son fonctionnement

L'analyse et le traitement d'une thématique urbaine doit s'appuyer sur la définition de la ville. Or cet exercice n'est pas des plus simples. L'objectif de cette section est donc de partir des diverses définitions de la ville relatives aux différentes disciplines des

sciences humaines et sociales pour en dégager une qui exprime le mieux les points saillants de notre problématique de recherche.

3.2.1. Eléments de définition de la ville

Bien que les préoccupations de la géographie humaine soient éminemment urbaines, il n'est pas aisé de définir de façon précise et rigoureuse la notion de ville car celle-ci revêt une signification relativement variable selon des disciplines telles que la géographie, la sociologie, les sciences politiques, l'économie urbaine, la démographie, l'urbanisme, l'architecture, etc., disciplines ayant des thématiques communes avec la géographie. En effet, les sociologues mettront l'accent sur l'importance et la nature des rencontres entre les hommes, du jeu des acteurs, ou verront la ville comme « *une organisation destinée à maximiser l'interaction sociale* » [Claval, 1981]. Les sciences politiques considèrent la ville comme l'expression de mécanismes de jeux de pouvoir, par des fonctions de domination ou de contrôle. Ces fonctions, qu'elles soient religieuses, militaires, économiques, culturelles sont à la base de considérations « territoriales » en ce sens qu'elles assureront un encadrement du territoire environnant. L'urbaniste la définira par ses formes, sa morphologie, son habitat, alors que l'architecte mettra notamment l'accent sur sa dimension esthétique. Le logisticien des transports l'assimilera à un lieu tantôt émetteur, tantôt récepteur de marchandises, ou simplement plate-forme de transit.

Ainsi, il nous paraît utile de rappeler les quatre définitions de la ville proposées par Beaumont [Beaumont et al., 1994] dans le domaine de l'économie spatiale, et qui suffisent à conclure sur la diversité des approches possibles :

- a) *Siège du pouvoir et matérialisation de la société dans l'espace, image que celle-ci veut donner d'elle-même, sinon même artifice qu'elle utilise pour cacher certains de ces aspects.*
- b) *Un état d'esprit, un corps de coutumes et de traditions, le creuset culturel et moral de la société, le réceptacle de ses valeurs et de ses comportements.*
- c) *Rassemblement d'activités et de population concentrée permettant de valoriser la proximité.*
- d) *Se caractérise par le degré de concentration de l'habitat, la continuité de l'espace bâti et l'exercice d'activités spécifiques non agricoles.*

Force est donc de constater que la ville est suffisamment multidimensionnelle, multiforme et même un objet d'étude pluridisciplinaire pour en interdire une acception unifiée, d'autant plus que la sensibilité individuelle ajoute une part importante de subjectivité dans la perception de la ville, quand bien même celle-ci semble "objectivée". En conséquence, définir la ville nécessite un parti pris, l'abandon de certains critères pour une acception univoque ; ce qui entraîne nécessairement une appréhension partielle et partielle de sa complexité.

3.2.2. Souscrire à une vision de la ville

L'analyse géographique cherche à comprendre l'organisation de l'espace : les processus à l'œuvre et les structures spatiales qui en résultent. Dans ce but, elle élabore des théories, en dérive des hypothèses explicatives particulières, et teste ensuite ces hypothèses en les confrontant à la réalité observée (ou à des résultats expérimentaux).

Dans le cadre de cette thèse, nous associons à la ville l'espace « [*...dans lequel elle se déploie et celui qu'elle organise*] » [Pumain et al., 1996]. Il ne s'agit pas de l'espace philosophique défini par Kant comme une forme *a priori* de la sensibilité, une donnée originelle constitutive de notre façon de percevoir [Martouzet, 1995], mais l'espace géographique, conçu avant tout comme un espace de relations, un espace composé de lieux (au sens d'emplacement géographique) possédant chacun une étendue, dotés d'attributs, et séparés les uns des autres par des distances [Beguin, 1994]. De ce fait, la ville n'est donc pas immuable, l'Homme agit sur l'espace, il le transforme, le façonne, l'aménage. Toute approche de la ville est alors indissociable de sa ***dimension temporelle***.

L'échelle d'analyse enfin est tout aussi fondamentale pour quiconque désire définir la ville. Jean-Bernard Racine [Racine, 1996] distingue la ville *dans* l'espace d'une part, et la ville *comme* espace d'autre part. Ces deux approches sont à la fois antagonistes et complémentaires. D'une part, il y a celle qui s'intéresse à la ville elle-même, comme un objet en soi. Il importe de définir son fonctionnement interne (formes d'habitat, conséquences de la répartition spatiale des quartiers résidentiels et ceux qui concentrent les activités économiques, structures démographiques,...). On cherche alors à décrire et comprendre la ville à l'intérieur de ses limites [Roncayolo, 1982] afin de procéder à des études prospectives. C'est la vision développée notamment par les urbanistes, les aménageurs ou les architectes. Ces derniers analysent son organisation, ses formes,

comme entité “isolée du monde extérieur”. La création d’un quartier ou d’un îlot urbain nécessitera une mise en cohérence avec l’ensemble de la ville, autant du point de vue urbanistique qu’au niveau des relations à constituer. La ville est alors considérée comme un système à part entière. D’autre part, il y a l’approche qui s’attache à étudier la ville sans ignorer qu’elle est localisée géographiquement dans un espace plus vaste, telle qu’elle pourrait être perçue à partir d’une photographie aérienne. Elle n’est plus individualisée, elle agit sur son environnement, sur d’autres villes, autant qu’elle subit leur influence. Cette conception reconnaît explicitement que la ville n’est pas un objet géographique isolé, elle se déploie sur un espace englobant, mais inversement ce dernier est une dimension incontournable dans l’analyse de l’objet urbain. Elle est alors considérée comme un sous-système d’un système plus vaste, ici un réseau urbain [Walliser, 1977].

Dans le cadre de cette recherche, nous concevons la ville dans ses dimensions spatiale, fonctionnelle et temporelle : les relations, caractérisées par les jeux d’acteurs et les enjeux de localisations à travers le temps et l’espace ainsi que la manifestation (l’empreinte spatiale) des conséquences de ces interrelations feront donc partie intégrante de notre démarche.

Toutefois, la définition statistique élaborée par l’INSEE est exempte de toute ambiguïté et équivoque disciplinaire.

3.2.3. Un nouveau découpage statistique pour cerner la ville

Les “aires urbaines” sont un nouvel indicateur statistique qui permet actuellement d’appréhender les villes et leur fonctionnement. Le découpage en près de 36 700 communes du territoire français constituerait en effet pour l’INSEE un atout de taille pour l’éclatement de l’information socio-démographique à un niveau géographique théoriquement plus fin [Le Gléau et *al.*, 1996]. Dans les années 1950, ce maillage d’une très grande finesse a permis de définir les “unités urbaines”, reposant sur la notion de continuité de l’habitat : elle renvoyait à une image de l’espace géographique décomposé en communes urbaines (la ville) d’un côté, et communes rurales (la campagne) de l’autre. Cet indicateur “unité urbaine” est néanmoins rapidement devenu caduc face à l’évolution des modes de vie. En effet, des citadins viennent habiter des communes rurales, tout en conservant des contacts fréquents avec une ou des communes urbaines.

Ainsi, du fait de la périurbanisation, les limites de la ville sont devenues floues. Pour tenir compte de ces changements, l'INSEE a proposé un nouvel indicateur dès les années 1960, pour compléter les anciennes "unités urbaines" : les Zones de Peuplement Industriel et Urbain (ZPIU). Ainsi, alors que les "unités urbaines" reposaient sur le seul critère morphologique de la continuité de l'habitat, les ZPIU intègrent des critères plus divers, qui correspondent à une prise en compte plus réaliste de l'urbanisation. On y trouve, par exemple, la proportion de la population vivant de l'agriculture, le niveau des migrations domicile-travail, le taux d'accroissement démographique, etc. Concrètement, les ZPIU ont permis de dépasser l'ancienne dichotomie urbain-rural, en proposant de distinguer trois types de communes : les unités urbaines, les communes industrielles et les communes "dortoir". Les unités urbaines reprennent la même base que celles précédemment définies par l'INSEE, c'est-à-dire qu'elles se composent globalement aussi bien d'agglomérations multicommunales que de villes isolées [Le Gléau et *al.*, 1996, *op. cit.*]. Les communes industrielles sont ensuite devenues des communes rurales qui comptent un ou plusieurs établissements industriels, commerciaux ou administratifs de 20 salariés au moins, à condition que l'ensemble de ces établissements emploie au moins 100 personnes. Enfin, les communes-dortoirs sont des communes rurales non industrielles répondant à la condition suivante :

$$(PAE / PA) - 1,2 (PAG/PMO) \leq 0 \quad (3.1)$$

où

PAE = Population active résidant dans la commune mais travaillant hors de la commune ;

PA = Population active résidant dans la commune ;

PAG = Population des ménages ordinaires vivant de l'agriculture ;

PMO = Population des ménages ordinaires.

Les villes dortoirs sont donc un ensemble de communes qui ont un faible taux d'agriculteurs (terme PAG/PMO de l'équation 1.1) et/ou une forte proportion de migrants alternants (terme PAE/PA de l'équation 1.1) et une forte proportion de personnes vivent dans ces communes sans y travailler. Peu après, l'INSEE estime que l'indicateur des ZPIU est également devenu obsolète : il montre que le nombre de communes en ZPIU augmente de façon constante (on passe de 9 000 en 1962 à 29 000 en 1990), si bien qu'en 1990, l'espace rural traditionnel hors ZPIU ne représente plus

qu'un quart du territoire et 4% de la population totale [Nicot, 1996]. A l'origine de cette croissance extraordinaire, se trouve l'explosion des déplacements quotidiens et la très forte baisse des actifs travaillant dans l'agriculture [Le Jeannic, 1996].

En 1997, une nouvelle série de notions mises au point par l'INSEE vient donc remplacer les ZPIU pour mieux appréhender les territoires urbains : le Zonage en Aires Urbaines ou ZAU [Le Jeannic et al., 1997]. Pour définir ce nouvel indicateur, il ne s'agit plus de tenir compte de la morphologie des villes, c'est-à-dire d'intégrer la continuité des zones bâties, mais de s'intéresser aux logiques de vie des hommes au sein de ces zones bâties, indépendamment de la forme de ces dernières. Les experts consultés par l'INSEE à ce sujet ont montré qu'il est plus réaliste de considérer les Migrations Domicile-Travail (MDT) comme le critère le plus pertinent pour étudier les relations qu'une ville peut entretenir avec sa périphérie : *“ La dissociation croissante des lieux de résidence et des lieux de travail, la plus grande dispersion des premiers et la concentration des seconds, font aujourd'hui de l'offre de travail le vecteur le plus structurant de la centralité dans les nouveaux espaces métropolitains ”* [Berroir et al. 1996]. L'INSEE propose alors de baser l'indicateur essentiellement sur la lecture des MDT entre des pôles d'emploi et les communes qui accueillent ceux qui y travaillent. Le ZAU permet ainsi de distinguer le pôle urbain, la couronne périurbaine, les communes multipolarisées et l'espace urbain multipolaire. Les définitions de ces indicateurs et leur imbrication sont résumées à la figure 3.1.

3.2.4. Les structures urbaines dominantes

Parallèlement, le ZAU permet aussi de distinguer l'espace à dominante urbaine, c'est-à-dire l'ensemble des pôles urbains et des communes périurbaines, de l'espace à dominante rurale, c'est-à-dire l'ensemble des communes ou petites unités urbaines n'appartenant pas à l'espace à dominante urbaine. La campagne est ici encore définie par opposition à la ville, mais compte tenu de l'intégration du critère fonctionnel, elle ne s'oppose plus dans une simple dichotomie. Calculé à partir du recensement de 1990, l'espace à dominante urbaine regroupe 43 millions d'habitants sur les 57 millions que comptait la France à cette époque, soit plus des trois quarts. A l'intérieur de ces espaces urbains, 34 millions de personnes habitent les 361 pôles urbains et les 9 millions restant se dispersent dans les communes périurbaines. L'espace à dominante rurale regroupe quant à lui 13 millions de personnes environ (soit presque un quart) mais représente les

deux tiers des communes françaises, pour 71% de la superficie métropolitaine. L'aire urbaine, c'est-à-dire le pôle urbain auquel les communes rurales ou unités urbaines qui envoient au moins 40% de leurs actifs ayant un emploi ont été agrégées par itérations successives, apparaît ainsi comme un indicateur intéressant. C'est en effet ce découpage qui tient réellement compte du fonctionnement des villes pour déterminer leurs limites. Mais, il introduit aussi une double restriction dans la prise en compte de leurs périphéries.

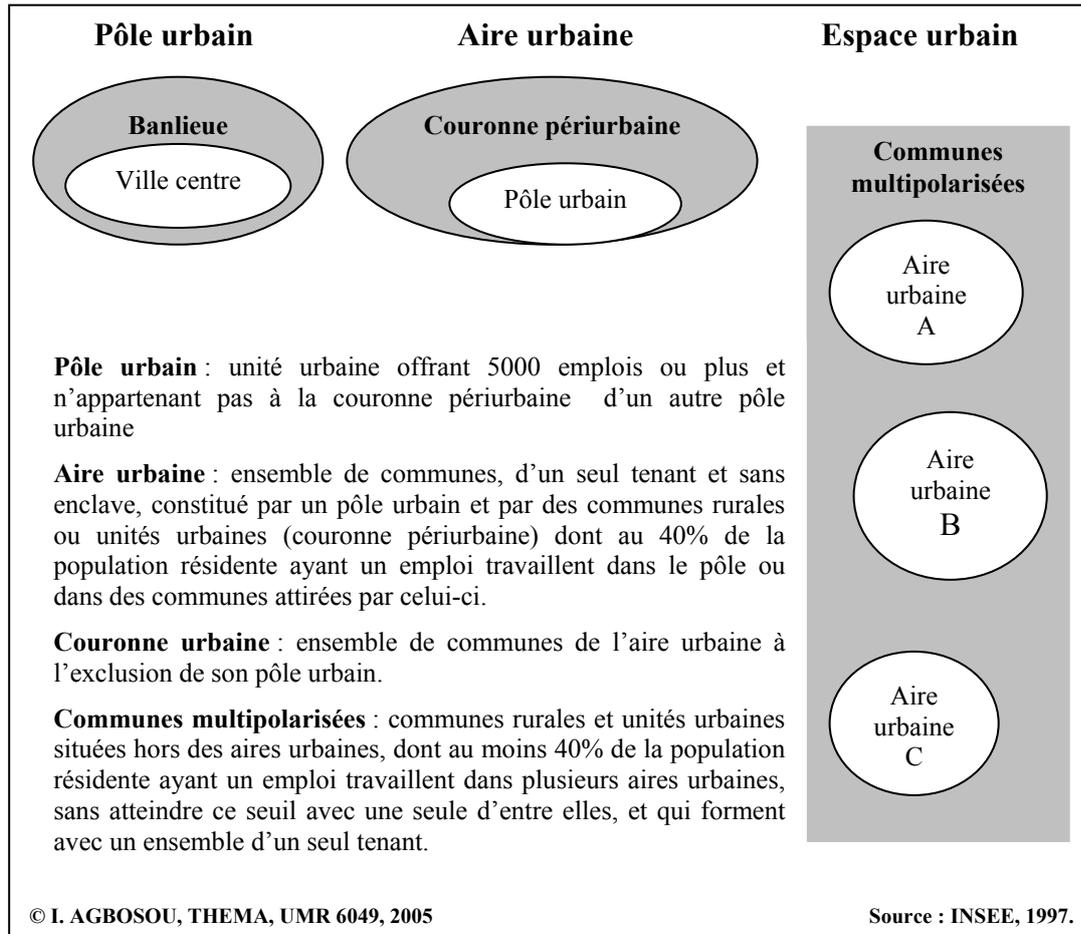


Figure 3.1 : *Le zonage en aires urbaines*

D'abord, les aires urbaines ne retiennent que les migrations orientées vers le pôle urbain comme seul lieu de destination (même si celui-ci s'agrandit au fil du temps). Le problème des migrations n'est donc traité que dans le sens "périphérie vers centre" et ne tient pas compte, par exemple, d'éventuels déplacements "périphérie vers périphérie" communément appelées liaisons orbitales. De surcroît, les migrations prises en compte ne sont que des déplacements de travail, et on sait, depuis les travaux de J.P. Orfeuil [Orfeuil, 1989] et de P. Troulay [INRETS, 1989] par exemple, que ceux-ci ne

représentent qu'environ 11 % du total des déplacements urbains quotidiens. Ensuite, les aires urbaines ne retiennent que les communes fortement polarisées vers le centre urbain, avec un seuil de 40% (plancher plutôt élevé, mais néanmoins critiquable et assez peu justifié par l'INSEE). Ainsi, la couronne périurbaine que forment les communes périphériques dont la population est attirée par le centre en raison des relations de travail constitue une sorte de zone tampon entre espace urbain et espace rural. En prenant en compte toutes ces considérations relatives au fonctionnement de la ville, il est impératif de disposer d'un cadre théorique bien formalisé pour la conduite des travaux d'analyse urbaine.

En raison de la définition de la ville qui a retenu notre attention, la théorie des systèmes constitue un cadre de référence qui nous semble bien adapté pour une conceptualisation du fonctionnement de la ville.

3.3. Approche systémique de la ville

Le concept de système et la référence à la théorie générale des systèmes de L. von Bertalanffy sont scientifiquement féconds parce qu'ils permettent d'étudier le comportement d'un ensemble socio-économique et/ou géographique au cours du temps, son évolution, sa dynamique [Pumain, 1989]. Si, le concept de système reste relatif à la discipline dans laquelle il est mis en application, il est très riche de signification. Classiquement, on définit un système comme étant à la fois un ensemble autonome par rapport avec son environnement, c'est-à-dire une indépendance conceptuelle, un ensemble cohérent constitué de sous-systèmes en interactions et enfin un ensemble subissant des modifications plus ou moins profondes mais lui assurant toujours une certaine cohérence. En d'autres termes, « *Un système est une entité dotée d'une certaine permanence et reconnaissable dans le temps, en interaction avec un environnement spécifique, constituée d'éléments groupés en associations simultanément interactives et se maintenant en état de stabilité dynamique dans les limites définies.* » [Cardon, 2004]. Il s'agit d'une définition très générale, portant sur les systèmes réels et sur les systèmes construits. Cette définition est à la fois structurelle et fonctionnelle, et le système se caractérise par le fait qu'il est constitué de différents sous-systèmes qui interagissent. Nous posons comme complément à cette définition qu'un système réel,

quel qu'il soit, doit conduire, pour être appelé système, à un méta objet modélisable et donc à un système formel. Sans ce complément, le système ne serait qu'un phénomène que nous pouvons observer sans pouvoir le comprendre à travers une analyse.

Cette définition du système précise les quatre caractéristiques qui confèrent à un phénomène observable la qualification de système. Il s'agit de l'autonomie par rapport à l'environnement de l'observation, la composition en différentes parties formées de composants, la plasticité de l'organisation des composants et la représentation formelle. En revanche, elle ne précise pas ce qui différencie un système fermé d'un système ouvert.

3.3.1. Définition d'un système fermé

Un système est dit fermé lorsque son fonctionnement et les interactions qu'il réalise avec son environnement sont relativement invariables. Un tel système n'a pas d'échange de matières avec son environnement, mais peut éventuellement échanger de l'énergie avec son environnement [Walliser, 1977, *op. cit.*]. Toutefois, cette caractéristique ne fait pas de lui un système isolé [Walliser, 1977, *op. cit.* ; Provitolo, 2002]. Par exemple, une gare ferroviaire jouant un rôle permanent dans l'acheminement des voyageurs et des marchandises : c'est à la fois un bâtiment et l'ensemble des fonctions précises et permanentes de ses différents services qui s'occupent de la gestion de l'entrée et de la sortie du fret et des voyageurs. De la même façon, le disque dur d'un ordinateur a une fonction précise qui se réalise de façon immuable par stockage de données (converties en bits) selon le système de fichiers : c'est un système chargé de la mémorisation permanente de l'information sous forme binaire bien structurée pour l'accès et la modification. Ces exemples illustrent bien le type de système dont le rôle général et la structure sont permanents et dont la fonction est bien définie dès le départ et ne change pas : ce sont des systèmes fermés. Un système fermé est donc un système dont l'architecture est globalement stable, dont le rôle est permanent et défini à la construction, dont le fonctionnement ne modifie ni ce rôle ni son architecture et dont les états sont entièrement prévisibles et déterministes. Ce qui n'est pas le cas d'un système ouvert.

3.3.2. Définition d'un système ouvert

Ludwig von Bertalanffy [Bertalanffy, 1968] dans son approche, a insisté sur la notion de système ouvert qui présente une alternative à la limite que constitue la notion de système fermé lorsqu'on s'intéresse plus particulièrement aux systèmes vivants et, donc aux sciences humaines et sociales. Un tel système est formé de composants polymorphes. C'est-à-dire que la fonction d'un composant donné du système ouvert est partiellement déterminée lors de la création de celui-ci et sa dynamique est surtout tributaire des relations et des processus d'échange entre lui-même et les autres composants du système. Des interactions entre les différents composants du système va émerger la dynamique de l'ensemble ; laquelle dynamique peut être ou non prévisible en fonction du degré de complexité des interactions.

Le système est dit ouvert lorsqu'il est constitué de nombreux composants polymorphes en interaction au sein d'un environnement qui s'ouvre vers l'extérieur. Et ses composants se trouvent à la fois en situation de concurrence et de complémentarité par le fait de son fonctionnement modifiant ainsi de façon continue l'état de chaque composant. En sciences humaines et sociales, en l'occurrence en géographie, ce type de système s'identifie notamment à la ville.

3.3.3. Conception systémique de la ville

En effet, la ville est un tout organisé : la répartition des activités, des habitants et des catégories sociales se combinant en proportions variables, selon des facteurs géographiques, socio-économiques et démographiques dont l'importance n'est pas à négliger, pour produire l'entité urbaine. Elle peut être définie par trois composantes [Bailly, 1983] : un ensemble de lieux (unités spatiales élémentaires), une métrique (distance temps, distance topologique ou distance longueur) qui permet de décrire les positions relatives de ces lieux les uns par rapport aux autres et une étendue. A ce triplet axiomatique de base qui représente finalement la dimension spatiale de la ville sont associées les dimensions fonctionnelle et temporelle qui sont bien évidemment en interrelation les unes par rapport aux autres comme l'illustre la figure 3.2.

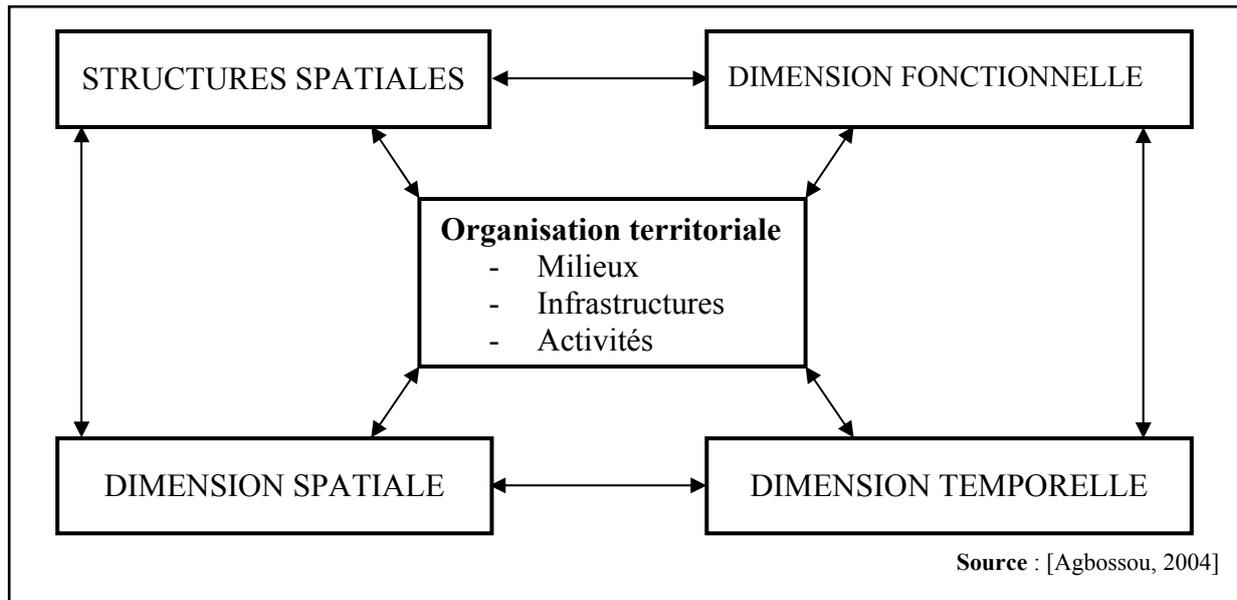


Figure 3.2 : Conception systémique de la ville

La dimension spatiale traduit la morphologie du tissu urbain dans toutes ses variantes selon l'échelle d'analyse (îlot, quartier, commune, agglomération de communes, etc.). Par exemple l'analyse fractale [Frankhauser et Pumain, 2001] permet de mesurer, à partir de la représentation cartographique d'un tissu urbain, la variation de la part de la surface bâtie en fonction de la distance à un endroit choisi (le centre du noyau urbain en général). La prise en compte de cette réalité morphologique de l'espace urbain à travers l'analyse des distances et des contiguïtés entre les unités spatiales élémentaires permet de mettre en évidence les phénomènes de différenciation spatiale.

La dimension fonctionnelle met en évidence les interactions des multiples processus se développant dans le temps sur l'espace urbain : processus démographiques (naissance, mortalité et solde migratoire), processus économiques (création et disparition d'emplois), processus d'aménagement et d'urbanisation, processus sociaux (mobilités résidentielles, mobilités liées à l'emploi et/ou aux études, mobilités liées aux loisirs, etc.) et aussi les processus culturels (évolution des aspirations sociales, évolution des technologies etc.). Tous ces processus participent, à une échelle micro-géographique, au maintien du système urbain en renforçant ses tendances à la stabilité qui s'exprime au niveau macro-géographique et favorise l'émergence de phénomènes difficiles voire impossible à identifier à l'échelle microscopique. *Ces différents processus peuvent être analysés selon une approche systémique. Mais dans le cadre de ce travail, en raison*

de la complexité de la thématique et du niveau de la finesse comportementale (échelle microscopique) des ménages, ils seront appréhendés au travers d'un formalisme multi agents. En effet, l'approche multi agent permet d'aller à une échelle plus fine des composants du système en mettant en évidence les interactions de très bas niveau. Ce qui permet de cerner le comportement global (échelle macroscopique) du système en adoptant une démarche bottom-up.

La dimension temporelle pour laquelle l'expression anglophone time-geography [Hägerstrand, 1970] est de plus en plus préférée pour des raisons de sémantique linguistique que certains auteurs [Chardonnel, 2001 ; DI Meo, 1999] ont déjà élucidé, est une notion relative aux temporalités dans les mobilités quotidiennes. Le temps est une ressource fondamentale à la réalisation et à l'organisation des activités humaines et, de ce fait, devient un facteur prépondérant dans la description et l'explication des phénomènes géographiques.

En définitive, la ville et les espaces géographiques associés constituent un système complexe composé d'un ensemble d'éléments en interactions. Ces éléments changent d'état ainsi que leurs types d'interactions. L'ensemble étant tel que tout accès et/ou modification directe ou indirecte, par un observateur et/ou un événement quelconque, à l'un ou plusieurs de ses éléments peut en perturber transitivement l'ensemble de façon non exactement prévisible. En conclusion, la ville est un système ouvert spatialement organisé dont la dynamique résulte des multiples interactions traduisant les boucles de rétroaction et à l'intérieur duquel l'ambition de la prise en compte du temps est d'éclairer les tenants et aboutissants des actions et des processus qui engendrent la complexité urbaine.

3.4. Appréhender la ville comme un système complexe

La signification du terme complexité dans l'usage courant et dans la science des systèmes reste encore assez vague et floue pour certaines disciplines et relativement précise pour d'autres. En informatique, il existe un consensus sémantique en ce qui concerne la complexité algorithmique. En géographie et les sciences humaines en

générale, on est loin d'un tel consensus, mais les recherches dans les divers champs disciplinaires y afférant sont très actives.

3.4.1. La complexité, une notion polysémique

Dans la littérature spécialisée, plusieurs définitions quelque peu équivalentes sont proposées. Mais s'il y en a une qui ait retenu notre attention, c'est celle que nous ont inspirée les idées de Le Moigne et de Morin [Le Moigne, 1999 ; Morin, 1986] qui s'énonce comme suit : « *Un phénomène complexe est la considération d'un objet, du monde réel, ayant une permanence, constitué d'un ensemble d'éléments en interactions, ces éléments changeant d'état ainsi que leurs interactions, l'ensemble étant tel que tout accès et/ou modification direct ou indirect, par un observateur ou un événement quelconque, à l'un de ses éléments peut en perturber transitivement l'ensemble de façon non exactement prévisible* ».

Cette notion de complexité implique celle d'imprévisible possible, d'émergence plausible du nouveau et du sens au sein du phénomène que l'on tient pour complexe [Le Moigne, 1999, *op. cit.*]. Un phénomène complexe existe réellement dans l'espace et le temps [Provitolo, 2007], il est identifiable comme un phénomène doté de permanence, et pourtant il change organisationnellement sans cesse, il modifie ses composants et leurs relations. Cette définition insiste sur la dépendance organisationnelle nécessaire entre le tout et les parties, à l'image de l'organisation urbaine, pour qualifier un phénomène complexe.

3.4.2. De la complexité du système urbain...

La ville est un système profondément complexe [Pumain, et *al.*, 1989]. C'est un système ouvert composé d'entités proactives (les différents acteurs urbains), dont le comportement spatio-temporel général est principalement déterminé par les actions communicationnelles engagées de manières autonomes par les entités. Ce qui justifie la nature complexe du système urbain, c'est que la ville est caractérisée par un ensemble d'interactions entre des acteurs localisés (qu'il sera possible de considérer à un niveau agrégé comme des interactions entre des agents du tissu urbain) qui engendrent, exploitent, détruisent et recréent continuellement à l'échelle de la ville entière des différenciations géographiques. Ces interactions sont de natures différentes et de formes

variées : compétition pour l'espace, tendances ségrégatives, les déplacements intra urbains etc. Ces interactions font état de processus de structuration, de différenciation, d'auto-organisation et d'émergence, qui n'existent en réalité que parce que la ville est un système ouvert en relation avec elle-même et avec l'extérieur. Ces interactions incessantes ont aussi des fonctions très importantes de régulation du fonctionnement interne de la ville et d'orientation de l'évolution du système qu'elle constitue. Ainsi, il n'est pas suffisant pour concevoir le principe de la complexité urbaine, d'associer les notions antagonistes de façon concurrente et complémentaire. Il faut considérer aussi le caractère même de l'association : « *l'organisation qui transforme chacun de ces termes dans les processus de rétroaction* » [Morin, 1977]. De façon concrète, la réalité de tout ce ceci s'exprime à travers la dynamique urbaine : processus d'une part et résultat d'autre part de divers phénomènes (la mobilité résidentielle en l'occurrence) que l'on peut observer tant à l'échelle microscopique qu'à l'échelle macroscopique.

3.4.3. ... à l'émergence urbaine

L'approche conceptuelle des processus émergents reste fortement discutée [Rennard, 2002]. Pour certains, il ne s'agit que d'une évocation intellectuelle destinée à masquer notre ignorance face à des phénomènes complexes, mais relevant d'une causalité classique. Puisque nous ne comprenons pas l'origine d'un phénomène donné, nous l'imputons à un mécanisme flou, mal défini et éventuellement fourre-tout que l'on appelle "*émergence*", alors qu'en fait le phénomène relève d'un déterminisme classique qu'une approche analytique plus poussée devrait permettre de comprendre. Il peut y avoir une certaine stabilité à l'échelle macroscopique mais ce n'est pas le cas à l'échelle microscopique.

Mais nous pensons que nier la spécificité des processus émergents, en l'occurrence dans l'étude des systèmes urbains, en considérant que certains phénomènes mal compris relèvent d'un strict réductionnisme revient à refuser l'éventualité des processus autres que ceux modélisés initialement. Une telle attitude scientifique suppose à considérer le réductionnisme comme un aboutissement et une démarche irrévocable. A la base du concept d'émergence on retrouve l'idée commune selon laquelle "*le tout est plus que la somme des parties*" [Le Moigne, 1999, *op. cit.*] ; on y retrouve donc la caractéristique centrale des processus non-linéaires avec le non respect de la superposition. Restant

dans cet ordre d'idée et en considérant la problématique centrale de cette recherche, le concept d'émergence retrouve tout son sens.

Ainsi, du fait de leur degré de complexité, les systèmes urbains sont largement adaptatifs donc émergents [Portugali, 2000]. En effet, la notion d'émergence urbaine qui est fortement liée aux théories de l'auto-organisation [Langlois, 2005 *op. cit.*] recouvre l'idée selon laquelle des configurations nouvelles ou inattendues peuvent apparaître dans un système urbain au cours de son évolution. Tout l'intérêt de cette émergence est mis en évidence par deux aspects. D'une part, les nouvelles configurations sont si pertinentes (c'est-à-dire présentant un degré de vraisemblance avec la réalité du phénomène étudié) dans le cadre analytique que le chercheur ne peut pas s'en passer dans l'identification des facteurs explicatifs du changement qualitatif de l'état du système étudié. Et d'autre part, les règles inhérentes à ces configurations ne sont généralement pas exprimées de façon explicite dans l'ensemble des règles initiales de fonctionnement du système.

Les systèmes urbains peuvent s'auto-organiser de deux manières possibles [Benenson et Torrens, 2005]. Premièrement, les objets géographiques statiques peuvent changer leurs propriétés en s'agglutinant pour faire émerger un agrégat géographique. Ou à l'inverse, des agrégats géographiques peuvent, par dissolution, donner naissance à de nouveaux objets géographiques dont les propriétés ne sont plus identiques à celles des objets pères. Les résultats des travaux de Dietrich Stauffer [Stauffer, 2001] sur la simulation par automates cellulaires des systèmes de vote à l'échelle régionale sont une illustration. Deuxièmement, les mêmes situations peuvent s'observer lorsque, non seulement, les objets géographiques statiques changent leurs propriétés, mais aussi quand les objets géographiques dynamiques (les ménages par exemple) changent de localisation. Les résultats des modèles de dynamiques résidentielles de Schelling et de Skoda [Schelling, 1969, 1971, 1974, 1978 ; Skoda, 1971] en sont des preuves. Le changement d'états et de localisations est un aspect particulièrement important dans les modèles de simulation des systèmes géographiques. Il constitue l'ensemble des rétroactions qui sont susceptibles d'accélérer ou de freiner les processus d'auto-organisation au sein des systèmes urbains dont la thématique principale s'articule autour de la mobilité. Ceci est une illustration de l'auto-organisation urbaine. Selon le "Principia Cybernetica" [Principia Cybernetica, 2003], l'auto-organisation est la propriété qui exprime le fait qu'un système change son organisation interne, soit en réponse aux conditions d'un autre système avec lequel il est en interaction, soit en tant que conséquence du

changement d'état des composants dont il est le système englobant. Bien que Alan Turing [Turing, 1952] soit le précurseur des travaux sur l'auto-organisation, Ross Ashby fut le premier à avoir clairement exposé ce concept dans un document publié [Ashby, 1956].

Comme nous l'avons expliqué en section 3.4, la ville est un système complexe. L'une des préoccupations majeures du géographe aménageur est : « comment appréhender l'auto-organisation urbaine afin d'être à même de proposer des scénarios d'aménagement durable ? ». Dans cet objectif, une démarche peut être de recourir à des modèles de simulation urbaine.

3.5. Des approches classiques de modélisation à la géosimulation urbaine

Le lien entre le développement de nouvelles technologies et l'émergence concomitante de nouveaux paradigmes de recherches est indéniable. En effet, de nombreux exemples prouvent que les progrès technologiques aident au développement de courants de recherche et à la mise en application des théories élaborées. Dans cette section, nous présentons l'évolution des pratiques de modélisation urbaine depuis les prémisses de l'analyse factorielle jusqu'aux approches actuelles de géosimulation. L'objectif est d'insister sur les phases de transition et de légitimation de chaque nouvelle approche toujours mieux adaptée aux défis d'une gestion urbaine plus efficace.

3.5.1. Les approches statiques

Une tradition fortement établie consiste à concevoir les modèles en sciences humaines selon une formalisation mathématique [Durand-Dastès, 2001]. Ces modèles peuvent être purement descriptifs ou prévisionnistes. Dans le second cas, le modèle est un assemblage d'équations différentielles alors que dans le premier cas, les modèles sont principalement statistiques [Langlois et Phipps, 1997].

L'usage de l'analyse factorielle comme principale méthode d'analyse de données en sciences humaines est un exemple de cette tradition. En effet, cette approche fut à l'origine élaborée en psychologie à partir des travaux de Spearman au début du XX^{ème} siècle [Spearman, 1904]. Malgré d'importants développements méthodologiques relatifs

à la factorisation (axes principaux) et la recherche de structures simples à l'aide des techniques de rotation, l'analyse factorielle restait une approche dont l'utilisation se limitait à un cercle restreint d'initiés jusqu'au milieu du siècle passé. La situation changea sérieusement à partir des années cinquante avec l'arrivée des ordinateurs. Royce notait que si les études factorielles étaient réputées jusqu'alors consommatrices de ressources considérables en termes de temps et d'effort, cela n'était plus le cas [Royce, 1958]. L'amélioration des ordinateurs a favorisé l'élaboration de nouveaux modèles d'analyse factorielle plus exigeants comme l'analyse factorielle à trois entrées qui permet d'appréhender un phénomène complexe dans son contexte spatio-temporel [Tucker, 1963].

Les ordinateurs à haute performance permirent également l'extension de l'analyse factorielle à de nouvelles disciplines. Ce fut particulièrement le cas des sciences humaines, hors de la psychologie, disciplines dans lesquelles le problème du traitement de matrices de données se posait avec acuité. A la fin des années soixante, Harman notait que l'analyse factorielle s'était déjà répandue dans diverses disciplines telles que la sociologie, la métrologie, les sciences politiques, la médecine et la géographie [Harman, 1967]. En quelques années, cette approche s'est imposée de fait en géographie [Berry, 1961, 1964 ; Phipps, 1966, 1968]. Ainsi cette approche fut intensément utilisée en écologie factorielle, un champ dérivé de la sociologie urbaine et de la géographie, dont l'objectif était de décrire des villes en utilisant spécifiquement l'analyse factorielle.

3.5.2. Les approches dynamiques

En géographie, l'étude de la dynamique des systèmes correspondait dans les années 80 à un souhait d'introduire des processus dynamiques dans une approche géographique qui était restée jusqu'alors essentiellement descriptive et statique [Guermond, 2005]. L'adaptation de la dynamique des systèmes de Forrester [Forrester, 1969] constituait une ouverture fascinante ; cependant elle souffrait d'une difficile prise en compte des phénomènes d'interactions spatiales sur différents niveaux d'échelle. En fait l'un des fondements théoriques de cette approche est l'idée que les organisations sont plus justement décrites si l'on s'intéresse aux flux qui les régulent, plutôt qu'aux éléments qui les composent. Forrester propose à cet effet ce nouvel instrument d'étude, fondé sur l'utilisation des boucles fermées où une variable de contrôle agit sur une variable d'action. Cette dernière, par l'intermédiaire d'éventuelles autres variables, contre réagit

sur cette même variable de contrôle. L'utilisation de ce mécanisme permet de montrer l'interaction mutuelle entre différentes variables d'un système complexe où la notion de pilotage évolue à chaque transition spatio-temporelle. La modélisation de l'interaction entre les différents éléments du système réel s'effectue par des systèmes d'équations différentielles.

La dynamique des systèmes fut proposée d'abord pour résoudre les problèmes liés à l'introduction de la dimension temporelle dans les études du comportement des systèmes complexes. L'application de ces modèles et les réactions qu'ils suscitèrent ont été considérées comme l'un des faits scientifiques ayant marqué les années soixante-dix [Langlois et Phipps, 1997 *op. cit.*]. Parmi les contributions les plus significatives que les travaux de Forrester ont permises, on peut noter l'idée de la limite à la croissance mondiale [Meadows et *al.*, 1972] et la notion de comportement contre-intuitif des systèmes complexes mis en lumière par le modèle urbain [Forrester, 1969, *op. cit.*]. Depuis, l'étude des systèmes complexes a fait de grands progrès tant du point de vue des méthodes que de la formalisation et des outils de modélisation. Le champ des applications de la théorie des systèmes complexes est extrêmement vaste et ses outils sont essentiellement développés par des mathématiciens, des physiciens théoriciens et des informaticiens. Ces outils peuvent d'être utilisés par toutes les disciplines travaillant sur des systèmes complexes. Cependant, il est important de souligner que ces outils ne sauraient être appliqués de manière uniforme à tous les systèmes complexes. Cette remarque fait sens parce que chaque système complexe modélise un phénomène particulier relié à une thématique bien définie ; et donc possède ces propriétés et caractéristiques intrinsèques dont il est important de tenir compte. Ceci suppose de choisir les outils en fonction de la problématique et des données, une adaptation des outils dans un souci de fiabilité.

3.5.3. Introduction à la géosimulation urbaine

L'usage des modèles dynamiques classiques fondés sur des variables d'état et des systèmes d'équations aux différences partielles n'a pas été satisfaisant. D'abord, cette pratique se heurtait à des barrières techniques, les fonctions régissant la dynamique des systèmes complexes n'étant pas, le plus souvent différenciables. Parce qu'il n'est pas aisé de trouver les solutions de manière analytique, l'aide de l'approche numérique

s'avère utile. Mais même dans ces conditions, les modèles classiques transgressaient plusieurs principes fondamentaux :

- étant de nature quantitative, ils laissent dans l'ombre les aspects qualitatifs des entités constituant le système ;
- les variables mesurables, au-delà de leur variation statistique, se trouvent souvent confondus aux variables d'état du système ;
- les éléments du système ne sont pas considérés dans leur individualité ; ce qui nuit à la prise en compte réelle des relations spatiales. En outre, les modèles de Forrester prennent difficilement en compte l'espace [Provitolo, 2006].

Dans un souci d'efficacité scientifique, les résultats de certains travaux novateurs¹ de la fin du XX^{ème} siècle ont considérablement bouleversé l'armature conceptuelle encadrant la dynamique des systèmes. Ainsi, il n'est plus possible d'aborder la dynamique des systèmes géographiques en esquivant les phénomènes de dynamique non linéaire, de bifurcation, d'auto-organisation, d'objets fractals ou de chaos déterministe. Naturellement, ces phénomènes sont pris en compte par les modèles actuels [Batty, 2005] de géosimulation urbaine.

3.5.3.1. Définition de la géosimulation

La géosimulation aborde la simulation des systèmes géographiques par une approche de modélisation collective des interactions entre et au sein des différentes entités du système. A l'inverse de l'approche qui part du global au particulier (de l'échelle macroscopique à l'échelle microscopique), la géosimulation est caractérisée par une approche générative du type *bottom-up* (c'est-à-dire du bas vers le haut). Le comportement global du système est le résultat des multiples interactions les plus élémentaires au sein de chaque entité du système étudié. Ce comportement global est observé grâce aux phénomènes d'auto-organisation et d'émergence que connaît le système [Holland, 1998].

Les modèles de géosimulation fonctionnent avec des variables, des paramètres mais aussi avec des agents (le concept d'agent est exposé en Chapitre 4) représentant les individus humains du système et des objets spatiaux décrits à leur échelle la plus petite

¹ Parmi les auteurs de ces travaux, on peut citer entre autres : Hermann Haken, Edward Lorenz, Ludwig von Bertalanffy, Robert May, Mitchell Feigenbaum, Ilya Prigogine, René Thom, Benoît Mandelbrot, Heinrich von Foerster, Francisco Varela, etc.

possible pour une meilleure appréhension du phénomène étudié. Ces agents et objets spatiaux ont des comportements qui varient au cours du temps. Les modèles de géosimulation sont donc développés dans le but de représenter et de simuler la dynamique des systèmes urbains. Ces derniers sont déjà par nature des systèmes complexes. La géosimulation insiste donc sur la modélisation des unités les plus élémentaires du système ainsi que les interactions de très bas niveau entre ces unités.

3.5.3.2. *Caractéristiques des modèles de géosimulation*

Le but de la simulation est d'apporter des résultats suffisamment proches d'une réalité que l'on cherche à comprendre. Mais, du fait de leur complexité, les systèmes géographiques ne peuvent se modéliser mathématiquement de manière simple [Langlois, 2005, *op. cit.*]. Pour palier cette difficulté, les modèles de géosimulation sont formalisés dans un but plus opératoire. C'est-à-dire qu'ils permettent une construction informatique en vue de simulations. Ces modèles tiennent compte aussi bien de la diversité des agents, des objets spatiaux et de leur organisation et des interactions qui font évoluer le système.

◆ *La modélisation des entités spatiales*

L'un des aspects les plus basiques mais tout aussi importants des approches de géosimulation est la prise en compte de la dimension spatiale de la problématique dans laquelle s'insère la démarche de modélisation. Traditionnellement, les modèles de simulations urbaines représentent les entités spatiales comme des agrégats d'unités spatiales en les faisant subordonner d'hypothèses d'homogénéité spatiale [Benenson et Torrens, 2005 *op. cit.*]. Mais en réalité, ces unités peuvent être encore subdivisées en plusieurs autres unités non homogènes [Openshaw, 1983]. Etant donné que les modèles de géosimulation sont formalisés selon une approche du type *bottom-up*, ils privilégient l'usage d'entités spatiales irréductibles et indéformables par rapport à la problématique étudiée. Il faut noter que cela est rendu possible grâce à la disponibilité croissante des images satellitaires à très haute résolution (image à définition de plus en plus fine). Dans ce contexte, les entités spatiales de la géosimulation sont d'abord des objets géographiques au sens spatial et géométrique (*cf.* Figure 3.3). Un objet est dit géographique s'il est localisable, délimité et identifié pour être différencié des autres

[Langlois, 2005, *op. cit.*]. Les unités spatiales de la géosimulation sont donc relatives à une échelle, une temporalité et possèdent une sémantique bien précise. Ceci renvoie à la notion de “*granularité*” qui constitue le découpage le plus fin en dessous duquel on ne différencie plus les sémantiques associées à chaque unité spatiale. Ce sont typiquement les pixels d’une image. Hormis la sémantique, la géométrie et la topologie sont deux autres informations nécessaires à la structuration des unités spatiales aussi bien dans leur individualité que dans leur organisation collaborative.

La *géométrie* sert en général à délimiter les unités spatiales par leurs différents contours. Pour un objet surfacique, chaque contour est le plus souvent représenté par un polygone fermé, qu’on peut représenter par la suite des coordonnées de ses sommets. Ce choix descriptif est appelé *description vectorielle* de la géométrie. Mais on peut aussi définir l’unité d’abord par son contenu en lien avec la sémantique qui lui est associée puis en déduire ses contours par agrégation des pixels du contenu. Dans ce cas on parle de description *raster* ou *image*. Elle est caractéristique du traitement d’image. Cette description présente l’avantage de pouvoir décrire l’espace géographique de manière continue.

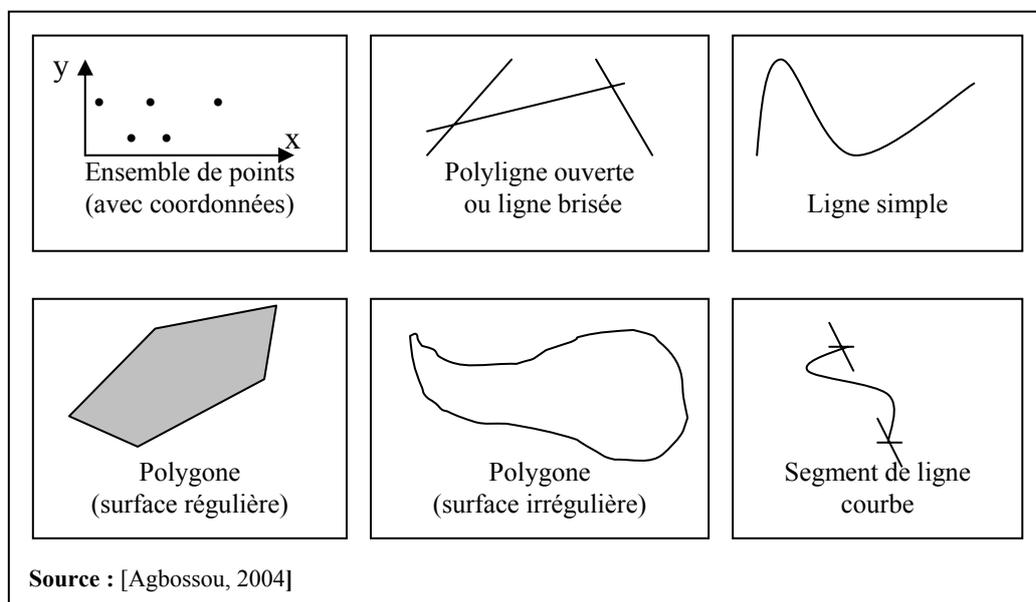


Figure 3.3 : *Typologie des objets géographiques primitifs et statiques*

La *topologie* est la structure qui permet d’organiser les relations de proximité, de voisinage (le concept de voisinage est présenté en détail en Chapitre 5) entre les entités spatiales. L’application des principes de la topologie associés à la théorie des graphes

assure la cohérence des données géométriques et facilite leur utilisation parce qu'elle élimine la redondance des points, lorsqu'il s'agit de former des lignes, et la redondance des lignes, lorsqu'il s'agit de former des polygones.

◆ *Les interactions*

Le second aspect de la géosimulation est la prise en compte des interactions dans les modèles de simulation. François Durand-Dastès [Durand-Dastès, 1984] définit l'interaction spatiale par le fait que « *les contenus des lieux agissent les uns sur les autres par une série de relations réciproques* ». Patrice Langlois [Langlois, 2005 *op. cit.*] apporte une précision à ce concept en stipulant qu'une interaction spatiale définie sur un ensemble d'objets géographiques (les objets géographiques du système étudié), est le résultat macroscopique de l'action de "particules microscopiques d'interaction" qui transforment progressivement les objets du système. Ces particules peuvent être des individus, des objets matériels, des idées ou des informations qui se transforment, croissent, se déplacent dans l'espace d'étude. Une fois encore, l'interaction est définie entre les éléments de bas niveaux du système pour faire émerger le comportement global du système. Le concept d'interaction permet ainsi de relier, grâce au ciment temporel, deux niveaux conceptuels, celui des entités spatiales et des individus.

◆ *La gestion du temps*

La troisième caractéristique de la géosimulation est la prise en compte de la dimension temporelle dans les modèles. Les systèmes urbains changent de configuration au fil du temps, et différents phénomènes apparaissent à diverses échelles temporelles. La formalisation théorique de la réalité se base sur un parallélisme relatif. En fait, on tient compte du fait que les agents du système interagissent tous simultanément, de façon continue, avec la possibilité de synchroniser leurs actions en cas de nécessité (ce qui n'est pas tout à fait conforme à la réalité non plus). Ce qui implique que chaque agent doit avoir connaissance de sa localisation spatio-temporelle relativement aux autres. Mais la simulation sur ordinateur (notamment les PC de bureau) impose une autre façon (en raison des limites de la technologie actuelle relative au microprocesseur) de modéliser le temps, car la plupart des ordinateurs courants ne fonctionnent pas encore de manière massivement parallèle. De plus, l'horloge informatique est nécessairement

discrète. Pour ce faire, on opte en général pour les modes de simulation *synchrone* ou *asynchrone*.

En mode *synchrone*, tous les agents sont supposés changer d'état et/ou de comportement au même moment à chaque pas de simulation. On mémorise alors la configuration globale du système au temps t et on construit la nouvelle configuration au temps $t+1$ à partir de la mémoire à l'instant t . Le système évolue donc comme si le temps s'est arrêté entre les instants t et $t+1$. Dans ce mode de fonctionnement, l'ordre des calculs relatif à chaque agent à un pas de temps donné est sans influence. Cependant, il peut y avoir des conflits entre agents accédant à une même ressource lorsque cette dernière est limitée. Cette situation peut se produire par exemple lorsque deux ménages choisissent d'occuper le même appartement. Une solution classique à ce problème est d'en tenir compte depuis la modélisation en incorporant un modèle de gestion de conflit [Peckham et al., 1995 ; Noble, 2000].

En mode *asynchrone*, il n'est pas nécessaire de mémoriser l'état du système à l'instant précédent. Mais chaque pas de temps est décomposé en autant de sous unités temporelles qu'il y a d'agents en interaction dans le système à un instant précis. Concrètement, s'il y a n agents en interaction et que le pas de simulation est δt , on aura n fois $\delta t/n$ sous unités temporelles. Chaque agent i verra son état mis à jour à l'instant $t+(i*\delta t/n)$. Dans ce mode de fonctionnement, il est évident que l'ordre de mise à jour des agents aura une influence sur la configuration globale du système. Ainsi, pour ne pas introduire un biais à long terme, une solution classique est de redéfinir, de façon aléatoire, l'ordre de passage de tous les agents à chaque pas de simulation [Berec, 2000 ; Liu et Anderson, 2004].

Il faut souligner que ces deux modes de fonctionnement ne sont pas mutuellement exclusives ; mais techniquement, il est plus difficile de les faire cohabiter même si ce faisant, on atteint un degré de réalisme assez intéressant du point de vue de la simulation.

En conclusion, force est d'établir le constat suivant : pour comprendre les changements affectant l'espace géographique et ses différentes composantes, il existe aujourd'hui une diversité de modèles définis autour de la notion de systèmes complexes. Dans ces systèmes, l'espace constitue une composante essentielle : des individus y réalisent des activités, s'y localisent, s'y meuvent, etc. Au fil des décisions prises par ces individus, l'espace s'organise et évolue.

Pour modéliser et simuler ces systèmes, en l'occurrence les systèmes urbains, les approches de géosimulation urbaine, tels le paradigme multi agent ou les automates cellulaires, sont utilisées.

Une meilleure approche de modélisation et de simulation des systèmes urbains serait la combinaison des automates cellulaires et du paradigme multi agent où le volet spatial serait représenté par les automates cellulaires. Les règles de transition seraient alors dictées par le comportement des agents. L'une des finalités de notre thèse est de formaliser cette nouvelle approche et de proposer un simulateur prêt à l'emploi basé sur ce formalisme.

Bibliographie référencée

[Agbossou, 2004] I. Agbossou. Conception d'un système d'aide à la décision en localisation spatiale : concepts, formalisation et bases méthodologiques. Mémoire de DEA, Université Louis Pasteur de Strasbourg I, 2004.

[Antoni, 2003] J-P. Antoni. Modélisation de la dynamique de l'étalement urbain. Aspects conceptuels et gestionnaires. Application à Belfort. Thèse de doctorat de géographie. Université Louis Pasteur de Strasbourg I. Strasbourg, décembre 2003. Disponible sur : <http://eprints-scd-ulp.u-strasbg.fr:8080/10/10/htm/index-frmas.html> (consulté le 04.01.2005)

[Ashby, 1956] W. R. Ashby. An introduction to cybernetics. Editions Chapman & Hall. London 1956

[Bailly, 1983] A. Bailly. Espace géographique et espace vécu : vers de nouvelles dimensions de l'analyse. In Espace et localisation : la redécouverte de l'espace dans la pensée scientifique de langue française. Editions Economica. Paris, 1983

[Bassand et Brulhardt, 1980] M. Bassand, M-C. Brulhardt. La mobilité spatiale. Editions Georgi. Saint-Symphorien (Suisse) 1980

[Batty, 2005] M. Batty. Cities and Complexity. Understanding Cities with Cellular Automata, Agent-Based Models, and Fractals. The MIT Press, 2005

[Baumont, 1993] C. Baumont. Analyse des espaces urbains multicentriques. La localisation résidentielle. LATEC, CNRS, Université de Bourgogne, 1993.

[Beaumont et al., 2000] C. Beaumont, P-P. Combes, P-H. Derycke, H. Jayet. Économie géographique. Les théories à l'épreuve des faits. Editions Economica, Paris, 2000.

[Berec, 2002] L. Berec. Technics of spatial explicit individual-based models: construction, simulation and mean-field analysis. In Ecological Modelling (150), 2002

[Béguin et Pumain, 1994] M. Béguin, D. Pumain. La représentation des données géographiques. Statistique et cartographie. Editions Armand Colin. Paris 1994

[Benenson et Torrens, 2004] I. Benenson, P.M. Torrens. Géosimulation. Autoamata-based 106erritori of urban phenomena. Editions Wiley. England 2004. Reprinted june 2005

[Berroir et al., 1996] S. Berroir, N. Cattant, T. Saint-Julien. La structuration des territoires de la ville, entre agglomération et aire polarisée. Document de travail. EquipePARIS, CNRS. Université de Paris I, 1996

[Bertalanffy, 1968] L. Bertalanffy. General System Theory. New York, 1968

[Berry, 1964] B.J.L. Berry. Cities as systems within system of cities. Papers in Proceedings of the Regional Sciences Association vol. 13, 1964

[Berry, 1961] B.J.L. Berry. A method for deriving multiple factor uniform regions 1961

[Bonvalet et Brun, 2002] C. Bonvalet, J. Brun. Etat des lieux des recherches sur la mobilité résidentielle en France. In Accès à la ville. Les mobilités spatiales en question. Editions L'Harmattan. Paris 2002

[Bordin, 2002] P. Bordin. SIG : concepts, outils et données. Editions Hermès-Lavoisier. Paris,

2002

[**Cardon, 2004**] A. Cardon. Modéliser et concevoir une machine pensante : Approche de la conscience artificielle. Edition Vuibert, Paris 2004

[**Certu, 2002**] Certu. Quelle est la répartition spatiale des différents types de logements et son évolution ? Programme ACTEUR, 2002

[**Chardonnel, 2001**] S. Chardonnel. La time-geography : les individus dans le temps et dans l'espace. In Modèles en analyse spatiale. Editions Hermès. Paris 2001

[**Claval, 1981**] P. Claval. La logique des villes. Editions LITEC. Paris 1981

[**Cocu et Caruso, 2002**] N. Cocu, G. Caruso. Modéliser la complexité géographique. Vers une approche progressive Automates cellulaires-Systèmes Multi-Agents. Document de travail. Mai 2002. Disponible sur : http://www.geo.ucl.ac.be/IMAGES/Caruso_Cocu_WP.pdf (consulté le 16.12.2004)

[**Dauce, 2002**] E. Dauce. Systèmes dynamiques pour les sciences cognitives. In Approche dynamique de cognition artificielle. Editions Hermès. Paris, 2002

[**Derycke et al., 1996**] P-H. Derycke, J-M. Huriot, D. Pumain. Penser la ville. Théories et modèles. Collections VILLE, Paris, 1996.

[**DI Meo, 1999**] G. DI Meo. Géographies tranquilles du quotidien. Une analyse de la contribution des sciences sociales et de la géographie à l'étude des pratiques spatiales. In Les cahiers de géographie du Québec, vol 43 n° 118. Québec 1999

[**Drogoul et al., 2004**] A. Drogoul, N. Ferrand, J-P. Muller. Emergence : l'articulation du local au global. In Systèmes Multi-Agents. Editions TEC&DOC. Paris, 2004

[**Durand-Dastès, 2001**] F. Durand-Dastès. Les concepts de la modélisation en analyse spatiale. In Modèles en analyse spatiale. Editions Hermès. Paris 2001

[**Durand-Dastès, 1984**] F. Durand-Dastès. Systèmes et localisations : problèmes théoriques et formels. Colloque Géopoint Avignon. Groupe dupont 1984

[**Forrester, 1969**] J.W. Forrester. Urban Dynamics. MIP Press. Cambridge 1969

[**Frankhauser et Pumain, 2001**] P. Frankhauser, D. Pumain. Fractales et géographie. In Modèles en analyse spatiales. Editions Hermès. Paris 2001

[**Frankhauser et al., 1998**] P. Frankhauser, A. Moine, H. Bruch, C. Tannier, D. Josselin. Simulating settlement pattern dynamics by subjective attractivity evaluation of agents. Paper presented for the 37th meeting on Western Regional Science Association. Monterey, California, 1998

[**Frankhauser et al., 1997**] P. Frankhauser, C. Tannier, P. Gillon, D. Josselin. Simulating Urban pattern dynamics by using an alternative approach of modelization. In European Workshop on Theoretical and Quantitative Geography, Rostock, 1997

[**Frankhauser et al., 1995**] P. Frankhauser, MN. Mille, T. Back. Un modèle pour simuler l'impact d'un projet d'aménagement sur la dynamique urbaine. Congrès "Urban Utopia". Berlin 15-17 novembre 1995. Disponible sur : <http://thema.univ-comte.fr/MG/pdf/UrbanUtopia.pdf> (consulté le 14.11.2004)

[Frankhauser, 1993] P. Frankhauser. La fractalité des structures urbaines. Thèse de doctorat de l'Université Paris I, UFR de Géographie, Paris, 1993

[Frankhauser, 1996] P. Frankhauser. Echelles, hiérarchies et fait urbain. HDR de l'Université de Franche-Comté, Besançon, 1996.

[Girerd, 2004] G. Girerd. Analyse du comportement pendulaire dans la perspective d'un report modal. Thèse de doctorat de géographie. Université de Franche-Comté. Besançon 2004

[Guermond, 2005] Y. Guermond. Des modèles classiques à la modélisation incrémentale. In Modélisations en géographie : déterminismes et complexités. Editions Hermès. Paris 2005

[Guessoum, 2002] Z. Guessoum. Modèles multi-agents et systèmes dynamiques. In Approche dynamique de la cognition artificielle. Editions Hermès. Paris 2002

[Hägerstrand, 1985] T. Hägerstrand. Time-Geography: focus on the corporeality of man society and environment. In The Science of Praxis of Complexity. The United Nation University, 1985

[Hägerstrand, 1970] T. Hägerstrand. What about people in regional science? Paper of the Regional Science Association, 1970

[Harman, 1967] H.H. Harman. Modern Factor Analysis. University of Chicago Press, 1967

[Holland, 1998] J. Holland. Emergence: From chaos to order. Perseus Book. MA, 1998

[INRETS, 1989] INRETS. Un milliard de déplacements par semaine. La mobilité des français. La documentation française. INRETS (Institut National de Recherche sur les Transports et leur Sécurité), 1989

[Joerin, 1995] F. Joerin. Méthode multicritère d'aide à la décision et SIG pour la recherche d'un site. In Revue internationale de géomatique, 1995

[Laaribi, 2000] A. Laaribi. SIG et analyse multicritère. Editions Hermès. Paris, 2000

[Langlois, 2005] P. Langlois. Complexité et systèmes spatiaux. In Modélisations en géographie, déterminismes et complexités. Editions Hermès. Paris 2005

[Langlois et Phipps, 1997] A. Langlois, M. Phipps. Automates cellulaires : application à la simulation urbaine. Editions Hermès. Paris 1997

[Le Gléau et al., 1996] J-P. Le Gléau, D. Pumain, T. Saint-Julien. Villes d'Europe : à chaque pays sa définition. In Economie et statistique n° 294-295. 1996

[Le Jannic et Vidalenc, 1997] T. Le Jannic, J. Vidalenc. Pôles urbains et périurbanisation. Le zonage en aires urbaines. INSEE Première n° 516, 1997

[Le Jannic, 1996] T. Le Jannic. Une nouvelle approche territoriale de la ville. In Economie et statistique n° 294-295, 1996

[Le Moigne, 1977] J-L. Le Moigne. La théorie du système général. Presse universitaire française. Paris 1977

[Liu et Anderson, 2004] X-H. Liu, C. Anderson. Assessing the impact of temporal dynamics on land-use change 108erritori. In computers, Environment and Urban systems (28), 2004

- [**Martouzet, 1995**] D. Martouzet. Recherche du fondement de l'éthique de l'aménagement. Thèse de doctorat de géographie. Université de Tours. Tours 1995
- [**Meadows et al., 1972**] H.D. Meadows, D.L. Meadows, J. Randers, W. Behrens. The limits of growth. Universe Books, 1972
- [**Morin, 1991**] E. Morin. La Méthode. Tome 4 : les idées, leur habitat, leur vie, leurs mœurs. Editions Le Seuil. Paris 1991
- [**Morin, 1977**] E. Morin. La Méthode. Tome 1 : La nature de la nature. Editions Le Seuil. Paris 1977
- [**Nicot, 1996**] B-H. Nicot. La périurbanisation dans les zones de peuplement industriel et urbain. In Données urbaines. Editions Anthropos. Collections villes. Paris 1996
- [**Noble, 2000**] J. Noble. Basic relationships patterns. In Pattern Languages of Program Design. Editions Addison-Wesley. London, 2000
- [**Openshaw, 1983**] S. Openshaw. The Modifiable Areal Unit Problem. Geobooks, Norwich, 1983
- [**Orfeuill, 1999**] J-P Orfeuill. La mobilité : analyses, représentations, controverses. Université de Paris XII 1999
- [**Orfeuill, 1989**] J-P Orfeuill. Un milliard de déplacements par semaine, la mobilité des Français, INRETS, *La Documentation française*, 1989.
- [**Peckham et al., 1995**] J. Peckham, B. Mackellar, M. Doherty. Data models for extensible support of explicit relationships in design databases. In VLDB Journal n°4, 1995
- [**Phipps, 1968**] M. Phipps. Recherche de la structure d'un paysage local par les méthodes d'analyse multivariable. In Comptes rendus de l'Académie des Sciences de Paris, 1968
- [**Phipps, 1966**] M. Phipps. Introduction au concept de modèle biogéographique. In Actes du 2^{ème} Symposium International de Photo-Interprétation. Editions Technip. Paris 1966
- [**Portugali, 2000**] J. Portugali. Self-Organization and the city. Editions Springer. Berlin 2000
- [**Pumain et al., 1989**] D. Pumain, L. Sanders, T. Saint-Julien. Villes et auto-organisation. Editions Economica, Paris, 1989.
- [**Pumain et Saint-Julien, 2001**] D. Pumain, T. Saint-Julien. Les interactions spatiales. Volume 2 : interactions. Editions Armand Colin. Collection Cursus. Paris, 2001
- [**Pumain et al., 1996**] D. Pumain, P-H. Derycke J-M. Huriot. Pour une confrontation des théories urbaines. In Penser la ville. Editions Anthropos Economica. Paris 1996
- [**Pumain et Robic, 1996**] D. Pumain, M-c. Robic. Théoriser la ville. In Penser la ville, Théories et modèles. Editions Anthropos Economica. Collection Villes. Paris 1996
- [**Pumain et Godard, 1996**] D. Pumain, F. Godard. Données Urbaines, Vol. 1, Collection VILLES, 1996.
- [**Pumain et Saint-Julien, 1997**] D. Pumain, T. Saint-Julien. L'analyse 109errito, Volume 1 : Localisation, A. Colin, Collection Cursus, 1997.

[Pumain et Mattei, 1998] D. Pumain, M-F. Mattei. Données Urbaines, Vol. 2, Collection VILLE, 1998.

[Pumain et Mattei, 2003] D. Pumain, M-F. Mattei. Données Urbaines, Vol. 3, Collection VILLE, 2003.

[Principia Cybernetica, 2003] Principia Cybernetica, 2003 Disponible sur : <http://pespmc1.vub.ac.be> (consulté le 12.04.2006)

[Provitolo, 2002] D. Provitolo. Risque urbain, catastrophes et villes méditerranéennes. Thèse de doctorat de l'Université de Nice Sophia-Antipolis, Nice, 2002.

[Provitolo, 2006] D. Provitolo. La dynamique des systèmes selon J. W Forrester, 2006. Disponible sur http://www.hypergeo.eu/article.php3?id_article=384 (consulté le 20.09.2007)

[Provitolo, 2007] D. Provitolo. Les différentes formes de complexité des systèmes de risque et de catastrophe. In Catastrophes, discontinuités, ruptures, limites, frontières. Comment les analyser ? comment les anticiper ? 14^{ème} journées de Rochebrune. Rencontres interdisciplinaires sur les systèmes complexes naturels et artificiels du 21 au 27 janvier 2007, ENST, 2007.

[Racine, 1996] J-B Racine. Exurbanisation et métamorphisme péri-urbain. Introduction à l'étude de la croissance du grand Montréal. In Revue de géographie de Montréal n° 22. Montréal 1996

[Rennard, 2002] J-P Rennard. Vie artificielle. Où la biologie rencontre l'informatique. Illustré avec Java. Editions Vuibert. Paris 2002

[Rolland-May, 2000] C. Rolland-May. Evaluation des territoires : concepts, modèles, méthodes. Editions Hermès, Paris, 2000

[Roncayolo, 1982] M. Roncayolo. La ville et ses territoires. Editions Gallimard. Paris 1982

[Royce, 1958] J. Royce. The development of factor analysis. In the Journal of General Psychology n°58. New York 1958

[Sanders, 2006] L. Sanders. Les modèles agents en géographie urbaine. In Modélisation et simulation multi-agents : applications pour les sciences de l'Homme et de la Société. Edition Hermès-Lavoisier, Paris, 2006.

[Schelling, 1978] T.C. Schelling. Micromotives and Macrobehavior. Editions WW Norton and Company. New York, 1978

[Schelling, 1974] T.C. Schelling. On the ecology of micro-motives. In the corporate society. Editions R. Marris. London 1974

[Schelling, 1971] T.C. Schelling. Dynamic models of segregation. In Journal of Mathematical Sociology (1) 1971

[Schelling, 1969] T.C. Schelling. Models of segregation. In American Economic Review (59) 1969

[Skoda, 1971] J.M. Skoda. The checkerboard model of social interaction. In Journal of Mathematical Sociology (1) 1971

[Sperman, 1904] C. Sperman. General intelligence objectively determined and measured. In

Journal of Psychology n°15. New York 1904

[**Stauffer, 2001**] D. Stauffer. Monte Carlo simulation of Snajd models. In Journal of Artificial Societies and Social simulation. 2001. Disponible sur : <http://www.soc.survey.ac.uk/JASSS/5/1/4.html> (consulté le 15.03.2006)

[**Tannier, 2000**] C. Tannier. Les localisations commerciales de détail en milieu urbain, mieux connaître par la modélisation pour mieux aménager: réalisation d'un modèle d'évaluation de l'attractivité des agrégats commerciaux d'une ville pour différents types d'établissements commerciaux de détail. Thèse de doctorat de l'Université de Franche-Comté, Besançon, 2000.

[**Treuil et al., 2001**] J-P Treuil, C. Mullon, E. Perrier, M. Piron. Simulations multi-agents de dynamiques spatialisées. In Modèles en analyse spatiale. Editions Hermès. Paris 2001

[**Tucker, 1963**] L. R. Tucker. Implications of Factor Analysis of Tree-Way Matrices for Measurement of Change. In Problem in Measuring Change. Editions CW. Harris. University of Wisconsin Press, 1963

[**Turing, 1952**] A.M. Turing. The chemical basis for morphogenesis. In Philosophical Transactions of the Royal society of London. London 1952

[**Vanbergue, 2003**] D. Vanbergue. Conception de simulation multi-agents. Application à la simulation des migrations intra-urbaines de la ville de Bogota. Thèse de doctorat d'informatique. Université de Paris 6. Paris 2003

[**Wachter et al., 2005**] S. Wachter, J. Theys, Y. Crozet, J-P. Orfeuill. La mobilité urbaine en débat. Cinq scénarios pour le futur ? Editions Drast-Certu. Collection Transport et mobilité n° 46. 2005

[**Walliser, 1977**] B. Walliser. Systèmes et modèles. Introduction critique à l'analyse de systèmes. Essai, éditions du Seuil, Paris, 1977.

[**Weber, 1999**] C. Weber. Modélisation dynamique des interactions entre forme de mobilité et recomposition territoriale. Rapport du PSIG, 1999

[**Weidlich, 1991**] W. Weidlich. Physics, synergetics and social science-the approach of synergetics. Physic reports, vol. 204, n° 1, 1991.

[**Winder, 1999**] N. Winder. Modéliser dans un cadre thermodynamique : une réaction à l'article de Sanders, 1999. Disponible sur <http://www.cybergeogeo.eu/index2289.html> (Consulté le 12.07.2006).

Partie II

APPROPRIATION CONCEPTUELLE & MÉTHODOLOGIQUE DES OUTILS DE LA GÉOSIMULATION

Dans cette partie,

Chapitre 4 : L'approche multi-agents en géographie

**Chapitre 5 : Les automates cellulaires comme support à la
dynamique urbaine**

4

L'APPROCHE MULTI-AGENTS EN GÉOGRAPHIE

Un organisme est un système ordonné de structures et de fonctions intégrées.

A. Lwoff

Bien qu'ayant toujours considéré l'importance des interactions dans la structuration des systèmes, le courant systémique a plus mis l'accent sur l'analyse des flux entrants et sortants que sur l'aspect comportemental des interactions. En effet, la partie proprement opératoire de l'analyse systémique, depuis ses débuts avec Bertalanffy et surtout Forrester, s'est principalement consacrée à l'analyse des systèmes sous l'angle à la fois structurel (organisation des composants du système) et fonctionnel (l'accent est mis sur les flux et les boucles de rétroaction). Il en est de même des travaux de Le Moigne sur la théorie du système général et de ceux de Delattre sur les structures organisées [Delattre, 1971]. Bien qu'utile dans de nombreuses disciplines, et en dépit de son universalité incontestable, cette approche s'avère limitante [Ferber, 1995] puisque les seules notions véritablement fécondes que l'on y trouvait étaient celles de régulation, de stabilité, d'organisation et de fonction de transfert. Maintenant la notion d'émergence prend toute sa place. Une autre école de pensée [Prigogine, 1979] permet de comprendre les systèmes comme des entités auto-organisatrices dont le fonctionnement et l'évolution sont les produits du comportement d'un ensemble d'entités en interactions. Là encore, le postulat de l'auto-organisation repose sur les flux d'interconnexion et sur la modélisation des boucles de rétroaction [Weidlich, 1991, *op. cit.*].

En réalité, définir un système par ses relations globales explique les formes générales de son évolution à partir d'un point de vue macroscopique. Cette approche n'intègre pas

l'importance des actions individuelles qui concourent à l'élaboration de la structure et donc à l'organisation du système en tant que tel. Pour aborder ces problèmes, un effort particulier a été porté ces dernières décennies sur l'intelligence artificielle distribuée et les systèmes multi agents (SMA). Ces derniers présentent un certain nombre d'avantages [Ferber 1995, *op. cit.* ; Gasser, 2001 ; Briot, 2001] et proposent des modèles pour étudier les systèmes complexes au travers d'entités autonomes appelées agents. L'approche multi agents met donc en avant les interactions locales au sein du système et les phénomènes d'émergence qui en résultent. Il s'agit donc d'une forme de systémique, plus exactement d'une extension de la systémique classique, que J. Ferber qualifie de *néo-système*, fondée sur l'analyse des comportements d'agents interagissant. L'auto-organisation des systèmes étant alors le fruit des actions transformatrices des agents (le concept d'agent est présenté en section 4.2).

Après avoir exposé quelques généralités sur le paradigme multi agents, ce chapitre fait un tour d'horizon du concept d'agent pour introduire ensuite la construction des systèmes multi agents. Nous proposons ensuite une méthodologie orientée agent pour la modélisation conceptuelle des systèmes géographiques. La dernière section du chapitre est consacrée à la présentation de quelques applications géographiques des SMA.

4.1. Quelques généralités sur le paradigme multi agents

L'approche multi agents se situe au carrefour de plusieurs disciplines. Les deux plus importantes sont l'intelligence artificielle distribuée (IAD) et la vie artificielle ou intelligence artificielle (IA). L'IAD a pour objet de réaliser des organisations de systèmes capables de résoudre des problèmes par le biais d'un raisonnement le plus généralement fondé sur la manipulation de symboles (mathématiques discrètes, logique du premier ordre, etc.). L'IA cherche à comprendre et modéliser des systèmes doués de vie, c'est-à-dire capables de survivre, de penser, etc. De nombreuses communautés scientifiques font désormais appel au paradigme multi agents pour contribuer à résoudre les problèmes auxquels elles sont confrontées. Ainsi, les recherches associées aux SMA ne se cantonnent plus au domaine initial de l'IA de l'IAD, mais reposent sur des résultats de thématiques scientifiques techniques telles que le génie logiciel, les systèmes distribués, etc. A ce titre, les SMA constituent un des paradigmes les plus ouverts à l'expression de la transversalité. En effet, dans les domaines où les aspects relevant des sciences humaines et sociales interviennent, l'un des atouts des SMA réside dans leur pertinence à représenter les systèmes sous-jacents le plus naturellement possible tout en intégrant au mieux la complexité aux différentes échelles considérées.

Nous allons énumérer un ensemble (qui n'est pas forcément exhaustif au regard des multiples propriétés des SMA selon le domaine d'application) de caractéristiques des approches multi agents dans une perspective d'application aux sciences humaines et sociale.

4.1.1. L'intelligibilité

Les SMA offrent un ensemble d'abstractions qui, du fait de leur degré d'anthropomorphisme, sont plus facilement compréhensibles et abordables par les concepteurs et les utilisateurs des systèmes construits. C'est par exemple l'un des points mis en avant par Boissier, Gitton et Glize quand ils affirment qu' « *Une approche multi agents représente de manière exacte la façon dont la supervision fonctionne lors de l'apparition de profondes perturbations : intervention de différentes spécialités, échanges d'informations pertinentes entre eux, afin d'assurer la cohérence de la coordination mise en œuvre pour satisfaire l'objectif commun de superviser ou réparer un défaut* » [Boissier

et al., 2004]. Si cette propriété apparaît dans les problèmes d'ingénierie, elle est encore plus présente dans les applications de simulation en sciences sociales. Dans ces types d'application, il est assez naturel de modéliser les objets, les acteurs ou les entités naturelles en agents dans le SMA en mettant en relation les frontières des entités avec celles des agents. Il en est de même pour la modélisation des interactions entre entités et entre agents. Ces simulations, au-delà de l'aspect anthropomorphique, permettent également de préserver la structure de la réalité simulée.

D'autres applications de simulation utilisent les SMA pour des raisons similaires. Ainsi, lorsque la simulation est utilisée pour comprendre un système complexe et aider à la négociation entre différents acteurs humains [Bousquet et Le Page, 2001], une telle intelligibilité est importante. Par exemple, Dowing, Moss et Pahl-Wostl ont mis au point un modèle de simulation où les acteurs socio-économiques peuvent étudier l'impact des activités économiques et sociales sur les politiques de changement climatique [Dowing *et al.*, 2000]. Dans d'autres applications, comme celles qui sont développées Centre de coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement (<http://cormas.cirad.fr>), les acteurs économiques peuvent étudier l'impact des politiques agricoles sur la faune et la flore d'un parc naturel. Il s'agit d'une application dans laquelle on passe progressivement de la simulation de l'écosystème avec des agents réels (êtres humains) à la simulation de l'écosystème qui interagit avec des agents virtuels. Cette application permet de dérouler tout un ensemble de scénarios de simulation en s'appuyant sur les techniques de jeux de rôles. Le besoin essentiel de cette application est l'intelligibilité des modèles élaborés pour que les acteurs dont le rôle socioéconomique est mis en œuvre dans la simulation, puissent les comprendre et intervenir eux-mêmes dans la construction des simulations. Ils doivent également pouvoir interroger les modèles pour comprendre les raisons des comportements observés et tester différentes hypothèses en modifiant certains de leurs comportements.

4.1.2. L'autonomie

Communément, l'autonomie¹ désigne pour un organisme, la possibilité de décider par soi-même (organisation sociale, politique ou économique, individu, etc.). En systémique, elle qualifie un système qui se donne lui-même sa propre loi ou ses propres objectifs. Cette

¹ Du mot grec *autonomos* : qui réagit par ses propres lois (*auto* : soi-même ; *nomos* : loi).

caractéristique est centrale dans les SMA et a été mise en avant dès les premières applications multi agents. Du fait de l'autonomie, l'activité d'un agent ne peut être que partiellement contrôlée dans la mesure où il a la possibilité d'agir sur son extérieur (l'environnement et les autres agents) pour le transformer selon ses besoins spécifiques. Il possède donc un principe directeur qui motive et régit son comportement. On qualifie ainsi, souvent, un agent d'entité rationnelle². En concordance avec l'analyse faite pour les humains par Béjean, Midy et Peyron [Béjean et *al.*, 1999], cette rationalité est généralement limitée [Simon, 1982]. Cette limitation de la rationalité peut être imputée à trois sources relatives à la cognition, l'espace et le temps. En ce qui concerne la source cognitive, un agent ne peut pas tout traiter individuellement et doit s'associer à d'autres agents pour réaliser une tâche globale. Par exemple, un ménage qui cherche un nouvel appartement, n'hésitera pas à se faire aider par une agence spécialisée ou même ses proches. La limitation due à la source spatiale s'explique par le fait qu'un agent n'a qu'une perception partielle de son environnement. Ce dernier étant dynamique, un agent ne peut donc être sûr que son activité ne soit pas remise en cause au fil du temps durant la vie du système. L'agent peut prendre une décision stationnaire en fonction de critères ; mais son comportement peut changer dans le temps.

4.1.3. Le parallélisme

Un SMA est un système distribué, concurrent, au sein duquel se manifestent des interactions asynchrones en raison de la multiplicité et de la complexité des réseaux de relations existant entre les agents. Ce constat est amplifié par l'autonomie mise en exergue au niveau des agents : chaque agent peut poursuivre ses propres buts et construire sa propre représentation du monde. Afin de tirer pleinement profit de la caractéristique d'autonomie mise en évidence au sein de l'agent, les applications multi agents ajoutent à la propriété de distribution, celle du parallélisme³ (encore connue sous le vocable de *décentralisation*). Au-delà de sa justification paradigmatique, le parallélisme dans les SMA répond également à d'autres besoins.

² Nous préférons le terme *cohérence* à celui de *rationalité* dont les contours sont de plus en plus flous en raison du caractère subjectif et circonstanciel qui lui est associé.

³ Cette propriété a été mise en avant dans les premiers workshops annuels européens (1^{er}, 2^{ème} et 3^{ème}) du domaine au travers de l'initiative Decentralized Artificial Intelligence des différents volumes [Demazeau et Müller, 1990, 1991 ; Werner et Demazeau, 1992]

La complexité du problème ou de l'application peut justifier une approche décentralisée. Les sources de cette complexité pouvant être la taille de l'application, la multiplicité et l'hétérogénéité des comportements modélisés (l'exemple des ménages en est une illustration), la dynamique globale du système modélisé, etc.

Le parallélisme mis en œuvre peut également être motivé par le besoin de prendre en compte des contraintes physiques du système. Par exemple, dans les applications de simulation où la composante spatiale tient une place de choix, on peut laisser aux agents en interaction le soin de trouver par eux-mêmes les configurations spatiales optimisant un critère global.

La recherche du réalisme conduit également à privilégier ce mode de fonctionnement. Ainsi, dans nombre d'applications de simulation, aucun organe central n'assure la coordination globale système et les entités modélisées prennent les décisions par elles-mêmes. C'est le cas, par exemple, dans un projet européen FIRMA (Freshwater Integrated Resource Management with Agents) [Dowing *et al.*, 2000, *op. cit.*], dont l'un des objectifs est de comprendre l'effet produit par un ensemble d'acteurs sur les changements climatiques sur le territoire que ceux-ci partagent. Et ceci, en l'absence d'un modèle global qui jouerait le rôle de régulateur. L'hypothèse de travail étant que les activités de chacun de ces acteurs (non seulement activités environnementales, mais aussi activités socioéconomiques) concourent en fait à la gestion des changements.

Afin d'assurer un comportement global et cohérent du système malgré le parallélisme, les agents interagissent entre eux. Ces interactions se concrétisent par le biais de l'environnement du système.

4.1.4. La situation dans un environnement

De nombreuses applications multi agents présentent la caractéristique d'être "ancrées" dans un *environnement*. Cet ancrage signifie que l'évolution du système est la combinaison des évolutions réciproques de son comportement et de celui de l'environnement. Dans les SMA, il faut comprendre l'environnement comme étant le médium commun partagé par l'ensemble des agents du système. Selon les applications, il répond à un ensemble de besoins : offrir une source commune de données et de contraintes aux agents, être un lieu commun d'actions et d'influences entre les agents. Dans leur célèbre ouvrage intitulé « *Artificial Intelligence A Modern Approach* » (seconde

édition) [Russell et Norvig, 2003], S. Russell et P. Norvig ont proposé une classification⁴ qui montre la richesse de la problématique attachée à la modélisation de l'environnement des SMA en termes d'accessibilité, de déterminisme, de dynamique, de type de modèle (discret ou continu), etc.

Dans les applications géographiques, l'environnement pourra servir de référentiel spatial qui doit être le plus réaliste possible afin de mettre en relation les impacts locaux et globaux des phénomènes. A ce titre, il permet d'explicitier la composante spatiale des modèles qui permettent de structurer non seulement les données, mais aussi les interactions au sein du système. Au-delà de la composante spatiale, l'environnement prend également part à la définition du contexte dans lequel se déroulent les interactions entre les agents.

4.1.5. Les interactions

La notion d'interaction est au centre de la problématique des SMA. Une interaction est une mise en relation dynamique de deux ou plusieurs agents par le biais d'un ensemble d'actions réciproques. Découlant de l'autonomie et de la nature des agents, les interactions matérialisent la communication avec l'environnement et avec les autres agents au sein du système. Traiter le problème de l'interaction, revient à se donner les moyens de décrire les mécanismes élémentaires permettant aux agents d'interagir. C'est également pouvoir analyser et concevoir les différentes formes d'interactions que des agents peuvent pratiquer pour accomplir leur tâche et satisfaire leurs buts. Ainsi, pour un agent, interagir avec un autre constitue à la fois la source de sa puissance et l'origine de ses problèmes. En systémique, il s'agit de l'interaction positive et de l'interaction négative. En effet, l'interaction positive accroît la puissance des agents : il s'agit par exemple de la *coopération*. Selon Ferber, « *on dira que plusieurs agents coopèrent, ou encore qu'ils sont en situation de coopération, si l'une des deux conditions est vérifiée : 1. L'ajout d'un nouvel agent permet d'accroître différenciellement les performances du groupe ; 2. L'action des agents sert à éviter ou à résoudre des conflits potentiels ou actuels* » [Ferber, 1995, *op.cit.*].

⁴ Pour plus de détails sur cette classification, on pourra consulter avec intérêt la seconde édition de l'ouvrage de la page 40 à la page 42. Pour information, il existe depuis septembre 2006, une traduction française cet ouvrage. Cette traduction est référencée sous le code ISBN 2744071501.

Par exemple, lorsqu'un ménage à la recherche d'un appartement se fait aider par ses "proches" ou sollicite les services d'une agence immobilière, il accroît ses chances d'atteindre son but plus vite. En revanche, l'interaction peut engendrer un problème pour un agent lorsque ce dernier se trouve en situation de *conflit* ou de *compétition*. Par exemple, deux ménages distincts peuvent se trouver en situation de compétition lorsqu'ils désirent accéder à un même logement. Dans ce cas, le "perdant" sort du conflit en étant affaibli (s'il y a un gagnant). Sinon, les deux ménages devront ajuster leurs buts compte tenu de cette expérience. L'ensemble de ces interactions conduit à de nouvelles configurations non programmées à l'échelle du système.

4.1.6. L'émergence

Nous avons présenté dans le chapitre précédent le concept de l'émergence. Et nous avons précisé que dans la littérature, les termes auto-organisation et émergence ont des significations assez voisines. Le premier étant issu des sciences physiques et chimiques [Nicolis et Prigogine, 1981], le second étant plus utilisé par la biologie, donc par la vie artificielle [Cariani, 1991 ; Steels, 1991]. Dans le domaine des SMA, on peut lire dans [Drogoul et al., 2004] que « [...] les deux font référence au fait qu'un système, pris dans son ensemble, manifeste des comportements qui ne sont pas présents explicitement dans chacun de ces composants, et sont donc le résultat de la dynamique interne du système et/ou de ses interactions dynamiques avec son environnement ». Ainsi, la dynamique du système procède par une itération de la séquence des interprétations faites par chaque agent de son environnement local et des actions de l'agent sur l'environnement. Quand une telle dynamique se stabilise, alors on parle d'émergence d'une structure ou d'une fonctionnalité globale du système. Dès lors que le tout (le système global) rétroagit sur les parties (les entités et/ou les agents) via l'environnement, il y a aussi émergence pour les agents dans la mesure où c'est l'état global émergeant qui conditionne les comportements individuels de chaque agent. Ainsi, dans les SMA, une fonction globale est attendue à partir d'un ensemble de spécifications au niveau local de chacune des entités du système. Cette propriété du niveau global n'est pas programmée dans les agents et n'existe que par leurs interactions conduisant à des processus permanents de réorganisation.

4.2. Le concept d’agent

Le concept d’agent a été l’objet d’études pendant plusieurs décennies dans différentes disciplines. Il est non seulement utilisé dans les systèmes à base de connaissances, la robotique, le langage naturel, la chimie et d’autres domaines de l’intelligence artificielle, mais aussi dans des disciplines des sciences humaines et sociales comme la géographie, l’économie, etc. Avec l’évolution des nouvelles technologies et l’expansion de l’Internet, ce concept est davantage associé à plusieurs nouvelles applications.

4.2.1. Définition

Il est primordial de faire remarquer que la notion d’agent est un concept fondamentalement abstrait et revêt d’une sémantique polymorphe relative à l’échelle organisationnelle considérée et aussi à la discipline dans laquelle elle est mise en œuvre. En informatique, discipline dont l’importance pour les géographes n’est plus à démontrer notamment quant à la concrétisation des modèles de simulation, un agent est principalement un « *programme autonome et personnalisable et, pour les plus aboutis, présentant des caractéristiques d’auto-apprentissage et de communication avec ses alter-ego pour une action coopérative ou compétitive* » [Cardon, 2003]. Ainsi, en géographie le concept d’agent peut notamment s’appliquer à l’échelle spatiale en tant qu’entité changeant d’états. Il peut également s’appliquer au fonctionnement de la dynamique sociale au niveau individuel et/ou collectif.

Une autre définition du concept d’agent qui s’accorde bien aux préceptes de la géographie est celle de Ferber : « *Un agent est une entité physique ou abstraite qui est capable d’agir sur elle-même et sur son environnement, qui peut communiquer avec d’autres agents, qui poursuit un objectif individuel et dont le comportement est la conséquence de ses observations, de ses connaissances, de ses compétences et des interactions qu’il peut avoir avec les autres agents de l’environnement.* » [Ferber, 1989]. Dans la littérature, on peut trouver plusieurs autres définitions. Mais le point commun à toutes les définitions est que l’agent est une entité autonome qui agit au sein d’un environnement. En somme, au-delà de l’autonomie, trois autres propriétés fondamentales caractérisent un agent : la réactivité, la proactivité et la socialité.

La *réactivité* : l'agent est uniquement dirigé par des événements perçus dans l'environnement. Il réagit de manière "opportuniste" à ces changements.

La *proactivité* : à l'inverse des objets⁵, l'agent n'agit pas seulement en réponse à des changements de l'environnement. Il est aussi capable de s'assigner des buts et de prendre des initiatives pour les atteindre (par exemple élaborer des stratégies résidentielles).

La *socialité* : l'agent interagit avec les autres agents. Cette propriété caractérise le fait qu'un agent est capable de gérer le passage d'un niveau collectif (satisfaire un but commun à plusieurs agents) à un niveau individuel (gérer ses désirs et ses intentions, élaborer des plans pour atteindre un but qu'il s'est assigné, réduire les conflits entre buts, etc.) et inversement.

4.2.2. Agents réactifs et agents cognitifs

On oppose classiquement deux catégories d'agents : les agents réactifs et les agents cognitifs.

► Les agents réactifs sont définis uniquement à partir de règles de type stimulus-réponse. Ils permettent de modéliser des comportements très fins, mais ne possèdent pas d'états internes ou de mémoire historique. Selon Brooks [Brooks, 1986 ; 1991a ; 1991b], le comportement intelligent d'un agent devrait résulter de divers comportements plus simples. Un agent est alors vu comme un ensemble de comportements accomplissant une tâche donnée. Chaque comportement est une machine à états finis qui établit une relation entre une entité sensorielle et une action de sortie.

L'étude de la dynamique spatiale relative à une thématique géographique peut se référer à un modèle d'agents réactifs au sens des automates cellulaires (*cf.* chapitre suivant). Lorsqu'un agent est dépourvu de toute faculté mentale, il est représenté conceptuellement par un modèle abstrait de type stimulus-réponse. C'est-à-dire que le comportement de l'agent est régi par un ensemble de règles prédéfinies. Ces règles peuvent s'exécuter en parallèle ou séquentiellement. Ce type d'agent possède donc un voisinage lui permettant de raisonner sur son environnement immédiat ou lointain selon le cas. Le comportement d'un tel agent est résumé à la figure 4.1.

⁵ En termes de programmation informatique, les objets ont en commun avec les agents des similarités évidentes mais aussi des différences fondamentales. Un agent décide de son comportement en fonction de son état, de ses connaissances et de la perception qu'il a de son environnement. Les objets ne possèdent pas cette autonomie de contrôle.

► Les agents cognitifs sont dotés d’états internes ou de mémoire leur permettant de se représenter l’évolution de leur environnement. En clair, il s’agit d’agents qui possèdent des états mentaux. Pour la modélisation de ce type d’agent dans le cadre du raisonnement pratique⁶, les chercheurs ont développé l’architecture BDI (Belief, Desire, Intention) [Bratman, 1987 ; Bratman et *al.*, 1988 ; Georgeff et Lansky, 1987 ; Rao et Georgeff, 1991a, 1991b, 1992 ; Sing, 1994 ; Brazier et *al.*, 1997 ; Rana et *al.*, 2003]. Ces agents sont généralement modélisés avec les aptitudes mentales de *croyances*⁷ (ce que l’agent connaît de son environnement), de *désirs* (les objectifs potentiels que l’agent peut vouloir atteindre) et d’*intentions* (les objectifs pour lesquels l’agent s’est engagé). Un agent BDI doit donc mettre à jour ses connaissances en fonction des informations qui lui proviennent de son environnement, identifier quelles options lui sont offertes, filtrer ces options afin de déterminer de nouvelles intentions pour agir en conséquence.

L’étude de la dynamique socio-fonctionnelle relative à une thématique géographique peut se référer à un modèle d’agents cognitifs. Dans le cadre de nos travaux, les ménages sont modélisés selon une architecture BDI. C’est un modèle abstrait qui considère qu’un agent cognitif, c’est-à-dire doté de facultés mentales, prend ses décisions en fonction de son état de connaissances sur le monde réel, ses désirs et ses intentions. Ces connaissances peuvent être incomplètes ou erronées. Les désirs d’un agent ne pouvant pas tous être satisfaits, les intentions constituent les désirs potentiellement satisfaisables. Les intentions constituent donc un sous-ensemble dynamique des désirs. Conceptuellement, ces trois structures de données forment l’ossature d’un agent cognitif. Mais ce dernier ne “vit” pas en autarcie. Il évolue dans un environnement peuplé par ses pairs au sein du système. L’agent cognitif peut se trouver en situation de dépendance sociale vis-à-vis d’un ou d’autres agents du système. A ce titre, il répond à des événements en provenance du système ou du monde extérieur ; ce qui lui permet d’enrichir ou de mettre à jour son état de connaissances et par la même occasion, d’ajuster ses désirs et de filtrer ses intentions en fonction de ses objectifs. L’ensemble de ce processus est schématisé à la figure 4.2.

⁶ Traduction de l’expression anglaise « Practical reasoning » c’est-à-dire, le raisonnement tel qu’il se pratique chez les humains.

⁷ En raison de l’ambiguïté de ce concept, nous lui préférons le terme “*Connaissances*” ou “*Base de connaissances*” ou encore “*Conviction*”.

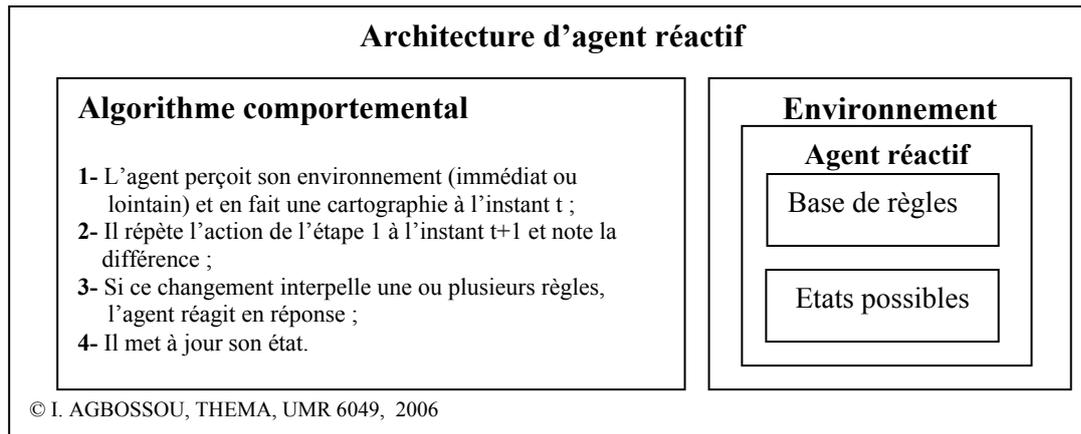


Figure 4.1 : Architecture d'agent réactif (adapté de [Agbossou, 2006])

4.2.3. L'anthropomorphisme des agents

Le projet NewTies de Nigel Gilbert [Gilbert et Troitzsch, 2005] montre que la reproduction d'attributs des sociétés humaines constitue un des objectifs des systèmes multi agents. Cet anthropomorphisme se trouve aux origines de l'IA. Lorsque cette discipline a été fondée par Allen Newell, Herbert Simon, Marvin Minsky et John McCarthy, la reproduction de l'intelligence humaine constituait l'objectif ultime. Les modes de raisonnement humain sont ainsi la source d'inspiration pour la création de systèmes informatiques capables de résoudre des problèmes similaires à ceux résolus par l'intelligence humaine.

De la même manière, les comportements collectifs humains et animaux représente une source métaphorique de résolution de problèmes à l'aide des systèmes multi agents. C'est ainsi que les chercheurs importent les notions de confiance, de réputation ou de pouvoir au sein des SMA [Castelfranchi, 1990 ; Carabela et *al.*, 2004 ; Melaye et Demazeau, 2004 ; Casare et Sichman, 2005 ; Sierra et Debenham, 2005 ; Huynh et *al.*, 2006]. D'autres cherchent à modéliser les interactions entre agents pour qu'elles correspondent mieux aux comportements humains. Par exemple, avec l'écoute flottante, Eric Platon essaie de concevoir des agents capables d'écouter aux portes [Platon et *al.*, 2005].

L'aspect anthropomorphique des agents informatiques contribue, avec l'usage d'un terme partagé, à les rapprocher des agents d'autres disciplines telles que l'économie [Folley, 2002 ; Axelrod, 2005] et la géographie.

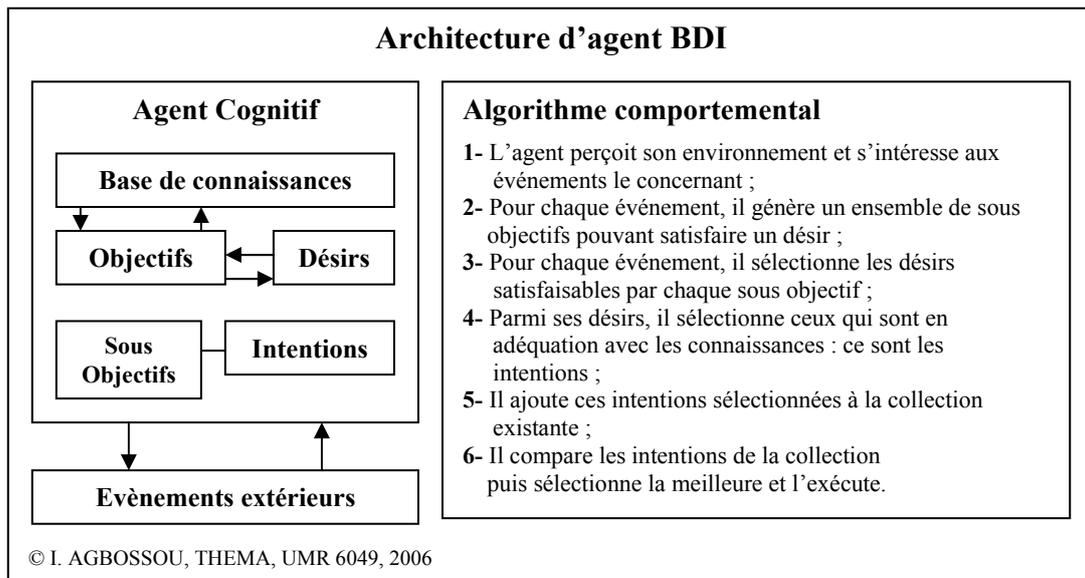


Figure 4.2 : Architecture d’agent BDI (adapté de [Agbossou, 2006])

4.3. Système multi agents versus simulation multi agents

Même si les termes sont souvent utilisés de manière interchangeable (par abus de langage) dans la communauté agent, ils présentent une différence assez subtile. En effet, la simulation multi agents fait partie des champs d’application des systèmes multi agents.

4.3.1. Définition d’un système multi agents

Un SMA est un ensemble d’agents interagissant. La figure 4.3 proposée par J. Ferber [Ferber, 1995 *op. cit.*], illustre les principaux concepts et composantes d’un SMA ainsi que leur relation. Un tel système repose sur l’existence concomitante d’un modèle d’agents (*cf.* §4.2.2), d’un modèle d’interactions multiscalaires (échelles micro et macro) bien spécifique à la discipline (la géographie en l’occurrence) et à une thématique bien précise (la mobilité résidentielle dans le cadre de notre thèse).

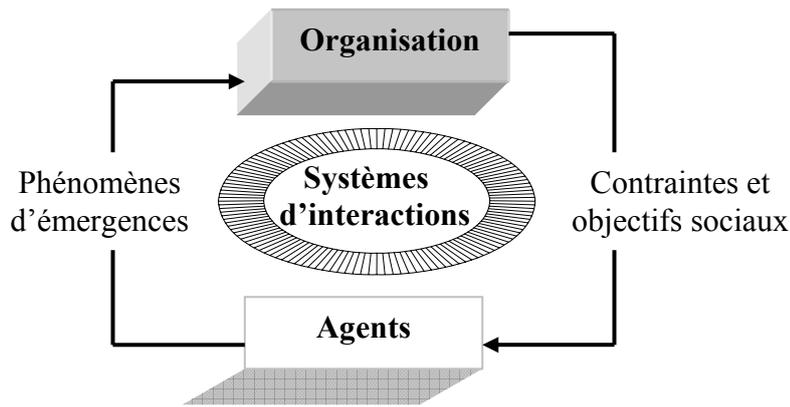


Figure 4.3 : *La relation micro-macro dans les SMA* (adapté de [Ferber, 1995])

S'il est d'ores et déjà établi que le comportement global du système émerge d'un ensemble d'interactions locales entre agents et aussi entre les agents et un ensemble de structures organisationnelles, il est primordial de comprendre comment cette émergence repose sur la dynamique du système. En effet, elle nécessite l'étude du rapport entre l'échelle microscopique et l'échelle macroscopique, c'est-à-dire entre les agents eux-mêmes et entre les agents et leur environnement. Pour une meilleure compréhension du processus d'émergence, nous proposons une illustration prenant pour support la figure 4.4.

Le niveau microscopique décrit les comportements des agents réactifs (qui n'ont pas une représentation explicite de l'environnement du système) régis par de simples règles de type automates cellulaires. Il décrit également un ensemble de comportements plus complexes représentés par les agents cognitifs. Ces derniers sont régis par des règles plus complexes que celles des agents réactifs. Ils peuvent alors analyser des informations, des faits et fonder leurs décisions sur leur perception de l'environnement dans lequel ils évoluent.

Le niveau macroscopique correspond au système global (la ville en l'occurrence) composé de son environnement physique et d'agents cognitifs organisés en société. Il définit l'organisation de la structure d'agents composant le système, et son rôle global. Deux types d'interactions sont donc identifiés : les interactions entre agents du même niveau et les interactions entre les deux niveaux. Les phénomènes d'émergence sont ainsi le résultat de ces interactions.

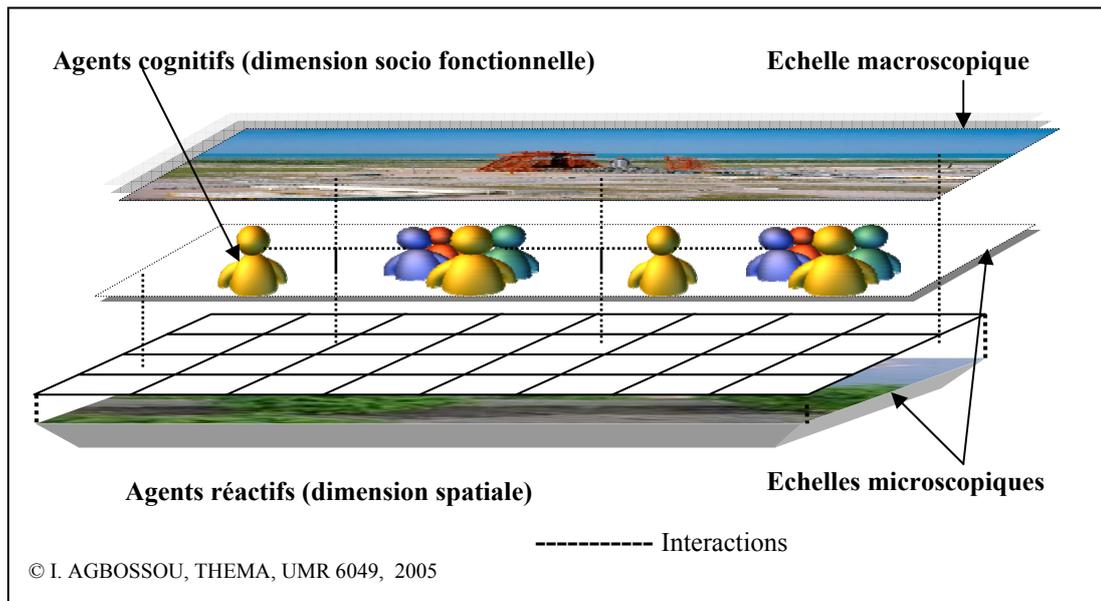


Figure 4.4 : *Articulations entre échelles micro et macro dans un SMA géographique*

4.3.2. Simulation multi agents

Le champ d'application des systèmes multi agents peut être organisé en trois grandes familles. Ces dernières sont identifiées par certains chercheurs [Boissier et *al.*, 2004, *op. cit.*] sous les vocables : *simuler*, *résoudre* et *intégrer*. Les applications multi agents regroupées dans la famille “*simuler*” ont pour finalité de modéliser et reproduire des phénomènes du monde réel, afin de comprendre et/ou d'expliquer leur comportement. Ce sont des applications telles que la simulation du trafic routier [Moukas et *al.*, 1998 ; Bazzan et Klügl, 2003], la simulation de phénomènes sociaux [Bensaid, 2003 ; Vanbergue et Drogoul, 2002 ; Conte et *al.*, 1998], la simulation de phénomènes biologiques [Drogoul, 1993 ; Doran, 2001 ; Edmonds, 2003], etc. La technique privilégiée dans ces applications est la simulation⁸, pour mettre en place des expérimentations de phénomènes du monde réel. C'est dans cette famille d'applications que s'inscrivent les expérimentations de notre travail de recherche.

Ainsi, l'approche multi agents permet de choisir le niveau d'abstraction sur lequel on veut se placer selon les objectifs de la simulation réalisée. En ayant cette possibilité, il devient possible de vérifier la pertinence des échelles habituellement choisies. En règle générale, on fait correspondre une entité réelle du système cible à un agent représentant ses

⁸ Globalement, la communauté utilisant cette technique de simulation couplée aux systèmes multi agents, est regroupée autour du journal JASSS (<http://www.soc.surrey.ac.uk/JASSS>), du workshop régulier MABS (Multi-Agent Based Simulation).

caractéristiques et ses comportements. Il est aussi possible d'envisager des agents ne représentant pas forcément une entité réelle mais plutôt un regroupement d'entités. En effet, dans une même simulation multi agents, il est possible d'avoir plusieurs échelles de temps et d'espace en représentant dans un même système des agents dits "microscopiques" et d'autres dits "macroscopiques". Ces derniers sont généralement le résultat du regroupement des premiers. Les travaux de Servat [Servat, 2000] dans le cadre du projet "Rivage" sont un très bon exemple d'une telle démarche. Le problème traité est celui de l'étude de la dynamique de ruissellement, d'infiltration et d'érosion. Les agents microscopiques représentent les boules d'eau qui, selon leurs milieux physiques, peuvent se regrouper pour constituer des agents mares ou cours d'eau. La dissolution de ces agents peut survenir si les boules d'eau les constituant changent de trajectoire.

4.4. Méthodologie orientée agent en géographie

Comment formuler, décrire et décomposer en termes d'agents une problématique géographique en prenant pour appui la théorie des systèmes ? Selon quelle(s) architecture(s) peut-on modéliser les différents agents pour qu'ils interagissent de manière cohérente ? Et enfin, quels types de données à utiliser et quelles sont les échelles d'articulations (spatiales et temporelles) du système que l'on veut simuler ?

Voilà quelques unes des interrogations qui peuvent orienter le chercheur dans sa démarche de modélisation et simulation multi agents en géographie. Dans le cadre de ce travail, nous nous sommes confrontés à de telles réflexions. Mais faute de la disponibilité d'une méthodologie applicable en géographie, il nous a paru indispensable d'en forger une (*cf.* Figure 4.5).

Il s'agit d'exposer une démarche de modélisation conceptuelle des thématiques géographiques dans une perspective de simulation. Cette démarche méthodologique est articulée en quatre phases principales : analyse structurelle et dimensionnelle, identification et spécification des agents, conception architecturale, implémentation. Seules les trois premières phases sont développées, la dernière étant plus technique et nécessitant des outils de génie logiciel et de programmation informatique, elle relève plus des préoccupations d'ordre informatique que géographique.

La concrétisation de cette méthodologie se déroule selon un processus unifié et itératif⁹ [Kruchten, 2000 ; Larman, 2003]. En effet, ce processus fournit un cadre générique définissant un ensemble d'activités inhérentes à la modélisation du système. Cet ensemble d'activités s'organise en un certain nombre d'itérations dont l'objectif est de maîtriser la complexité de la démarche.

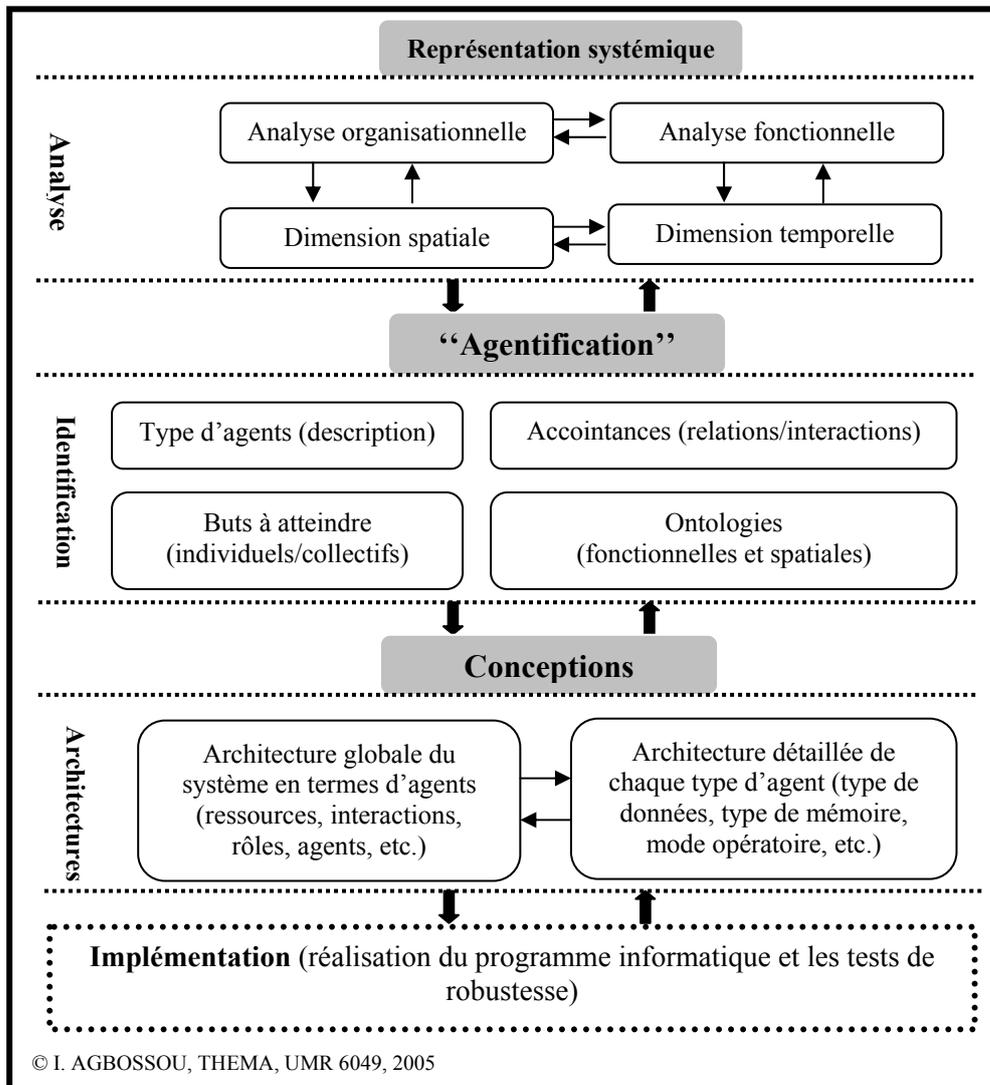


Figure 4.5 : Méthodologie orientée agent en géographie

Ces différentes étapes de la démarche méthodologique ne sont pas linéaires mais s'imbriquent plutôt les unes dans les autres. En l'occurrence, alors qu'on est en train de concevoir l'architecture détaillée des agents, on peut se rendre compte d'une erreur

⁹ Contrairement à la méthode en cascade, le processus unifié et itératif prône l'agilité lors de la modélisation des systèmes complexes c'est-à-dire qu'il est possible de remettre en cause ce qui est considéré comme acquis dans une phase antérieure pour une raison quelconque, et de se donner les moyens d'y revenir.

d'interprétation au niveau de la représentation systémique et donc d'y revenir sans affecter gravement les autres phases de la modélisation.

4.4.1. Analyse structurelle et dimensionnelle

Cette première phase consiste à dévoiler les spécificités générales de l'ensemble du système. Elle permet une description globale par une approche systémique de la problématique en vue de répondre aux exigences majeures telles que :

- une meilleure compréhension de la thématique ;
- une bonne circonspection de la problématique ;
- la facilitation de la conception d'une ou des solutions possibles.

L'analyse se traduit donc sous la forme d'un modèle systémique mettant l'accent sur les sous-systèmes (les grandes entités) ainsi que les relations existant entre ceux-ci.

4.4.2. Identification et spécification des agents

L'identification des agents est un exercice plus ou moins simple : la difficulté dépend à la fois de la thématique et de la problématique. Le repère à observer est la principale différence entre un agent et un objet : un agent possède un comportement autonome. Classiquement, un agent est une entité autonome qui agit pour atteindre un but en utilisant une vue partielle ou locale de son environnement. Ainsi pour des applications de modélisation et/ou de simulation des sociétés humaines, l'identification des agents ne pose guère de difficulté. En revanche pour des problématiques paysagères (nous considérons ici le paysage dans son acceptation géographique) ou de simulation de la dynamique d'un bassin versant ou encore de l'évolution d'une nappe phréatique, il est *a priori* moins aisé d'identifier les différents agents du système. Et c'est l'une des raisons pour lesquelles il est nécessaire de disposer d'une méthodologie orientée agent.

Dans les méthodes comme GAIA [Zambonelli et *al.*, 2005], INGENIAS [Pàvon et *al.*, 2005] et Prometheus [Padgham et Winikoff, 2005], l'identification des agents est subordonnée aux différents rôles joués par les entités structurelles du système. Dans la méthode Cassiopée [Collinot et Drogoul, 1996], les agents sont définis après l'identification des comportements élémentaires nécessaires à la réalisation de la tâche aux sous-systèmes. Somme toute, l'identification des agents doit respecter les principes suivants :

- un agent a une certaine connaissance du monde dans lequel il vit : un agent humain (souvent cognitif) est un exemple trivial. Les cellules spatiales dans un automate cellulaire ont connaissance de leur monde (environnement) au travers du concept de voisinage (*cf.* chapitre suivant) ;
- un agent est responsable de l’achèvement et de la maintenance de certains buts qui dictent son comportement ;
- un agent doit être capable d’observer le statut des autres agents et de certains objets de son environnement et doit être sensible à certains évènements ;
- les interactions mutuelles ou non entre agents doivent être décrites en termes d’actions communicantes ;
- un agent peut exécuter des actions directes affectant les propriétés d’autres agents et de certains objets de son environnement. Par exemple, une décision politique peut modifier le comportement des ménages dans leur choix résidentiel.

La spécification des agents consiste à les classer en fonction des objectifs qui leur sont assignés, de leur accointances, et la définition d’ontologies¹⁰ propres au système étudié. L’ontologie doit être vue comme pourvoyeur de sens et comme moyen d’introduire les traitements sémantiques des données nécessaires à la résolution de la problématique posée.

A partir de cette phase de la méthodologie, l’utilisation et la conformité aux standards¹¹ de la FIPA (Foundation for Intelligent Physical Agents) sont fortement recommandées. Il s’agit notamment de UML (Unified Modeling Language)¹² pour la modélisation graphique des objets et de AUML (Agents UML)¹³ pour la modélisation graphique des agents. En dehors de ces deux langages de modélisation, la FIPA supporte d’autres normes et standards relatifs aux outils de programmation orientée qui sont très bien documentés sur site web de la FIPA.

¹⁰ L’ontologie définit un vocabulaire de termes, accompagné de la spécification (définition des concepts et les liens entre ceux-ci afin de se conformer aux préceptes de la discipline et de limiter les interprétations ambiguës possibles). Pratiquement les ontologies correspondent à une représentation informatique (en général formelle) des concepts, des relations sémantiques et des heuristiques d’un domaine d’application.

¹¹ Ces documents sont disponibles en accès libre sur le site www.fipa.org.

¹² On pourra utilement consulter le site www.uml.org.

¹³ Consulter le site www.auml.org pour une documentation approfondie.

4.4.3. Conception architecturale

La conception architecturale a un double objectif : fournir un aperçu global du système, puis présenter l'architecture détaillée de chaque type d'agent.

L'architecture globale du système est obtenue à partir des spécifications de la phase précédente. Le diagramme réalisé est l'un des artefacts les plus importants pour la compréhension du fonctionnement du système multi agents. Ce diagramme met en évidence les différents types d'agents, leur perception et actions, les messages qu'ils sont susceptibles de s'envoyer ainsi que les types de données requises. Autrement dit, ce diagramme est une collection d'informations diverses et variées sur le système multi agents et présentée sous une forme visuelle et facilement compréhensible.

Quant à la conception de l'architecture détaillée, elle consiste à :

- préciser la structure interne de chaque agent en termes de buts, actions (ou plans), d'évènements, et de données en se fondant sur la description de la phase d'identification ; cette structure est représentée par un diagramme d'agent. ;
- décrire et concevoir le modèle d'interaction entre agents. Ce modèle est obtenu à partir des liens de dépendance et des relations intra et inter échelles (spatiale et fonctionnelle) entre agents tout en respectant les contraintes temporelles. A l'instar de la méthode GAIA, la description de chaque type d'interaction devra respecter un protocole bien précis possédant les attributs suivants :
 - Nom : il s'agit d'une brève description textuelle précisant le type d'interaction et son contexte de réalisation ;
 - Initiateur : les agents déclencheurs de l'interaction et les objectifs ou les actions pour lesquelles elle est nécessaire ;
 - Partenaires : les agents impliqués dans la réalisation de l'interaction ainsi que les objectifs ou actions intermédiaires devant être accomplies ;
 - Entrées : informations ou données utilisées par l'initiateur et les partenaires ;
 - Sorties : résultats de l'interaction sous forme de données exploitables (cartes, données numériques, etc.) par d'autres agents ou dans d'autres interactions ou même par un autre système ;

- Description : justification et explication de la finalité de l'interaction ainsi que son processus d'exécution sous forme d'algorithmes ou d'heuristiques.

Ce protocole est répété pour toutes les interactions de base nécessaires au fonctionnement du système. L'ensemble de tous les protocoles d'interaction de base constitue le modèle d'interactions.

En somme, l'application de cette démarche méthodologique dans le cadre d'une simulation multi agents en géographie permet d'obtenir le modèle conceptuel du système à simuler. Les différents éléments du système sont décrits ainsi que leurs fonctionnalités et interactions avec les autres composants du système. Chaque élément est ensuite représenté par un agent pour lequel on spécifie les fonctionnalités, les types de relations et interactions avec les autres agents, les mécanismes de communications, de coopération, etc.

La simulation proprement dite pourra dès lors prendre son cours. Le modèle conçu est implémenté pour obtenir une application exécutable qu'on fait tourner. Les résultats sont ensuite analysés par une variété de méthodes telles que les analyses statistiques, les techniques de visualisations (cartographie en l'occurrence), etc. Finalement, le but de tout cet exercice est d'arriver à des conclusions par rapport au système cible, en interprétant toutes ces conclusions relativement aux comportements exhibés lors de la simulation.

4.5. Quelques applications géographiques des SMA

Dans ce qui suit, nous présentons succinctement quatre modèles de simulation multi agents appliqués à des problématiques géographiques : SVERIGE¹⁴, MICDYN¹⁵, SIMPOP et AGENT. Ces présentations ne seront pas faites dans un souci d'exhaustivité. Il existe bien évidemment un grand nombre d'applications géographiques, mais nous nous limitons à ces quatre qui donnent déjà un aperçu des diverses possibilités et avantages offerts par le paradigme multi agents.

¹⁴ System for Visualising Economic and Regional Influences in Governing the Environment.

¹⁵ MICrosimulation DYNamique

4.5.1. SVERIGE : un modèle de simulation de biographies individuelles

C'est un modèle de microsimulation spatiale [Holm et *al.*, 2000] développé par une équipe de recherche suédoise. L'objectif est de disposer d'un modèle opérationnel de base sur lequel d'autres modèles pourront être greffés pour permettre de répondre à des questions de société ou des problématiques environnementales. Le cœur du modèle est essentiellement spatio-démographique et fonctionne à partir d'équations, de matrices de transition et de règles logiques. Le volet spatial est consacré aux migrations en faisant dépendre les décisions individuelles du contexte spatial dans lequel elles sont prises par les agents. La structure démographique intègre comme variables la fécondité, la mortalité, la cohabitation et le mariage, le divorce, le départ du domicile familial, l'éducation, l'emploi et les revenus, etc.

Ce modèle a été appliqué à un échantillon d'environ 14000 individus tirés aléatoirement parmi la population suédoise. La simulation a tourné sur une durée de cent ans de 1990 à 2090. Pour chaque agent, une vingtaine d'attributs (âge, revenu, lieu de résidence, etc.) sont actualisés chaque année. Sont stockés également à chaque pas de temps les événements (naissance, décès, migration, etc.) associés à chaque individu.

4.5.2. MICDYN : un modèle de simulation de dynamiques spatiales de populations

Il s'agit d'un modèle prévisionnel à l'échelle communale. Son objectif est de tester l'impact de différentes hypothèses concernant la croissance de l'emploi sur l'évolution de la distribution spatiale de la population au niveau communal dans les départements de l'Hérault et du Gard dans le sud de la France [Aschan et *al.*, 2000]. Dans le modèle, les règles sont formalisées au niveau des individus. Chaque pas de simulation correspond à une année et tous les agents sont considérés tour à tour afin d'évaluer les changements qui les affecteront au cours de l'année suivante. Ces changements sont fonction du vieillissement, de l'occurrence et de l'enchaînement d'événements (naissance, départ de chez les parents, mise en union, etc.) ainsi que l'arrivée de nouveaux migrants dans la région.

La commune de destination d'un individu est déterminée en fonction des disponibilités de logement et d'emploi correspondant à son profil socioprofessionnel, les lieux de résidence et de travail étant liés par une contrainte de distance maximale de 40 km.

En ce qui concerne l'évolution de la population, la simulation est faite sur 50 ans. A partir des observations de 1990, année de référence, on obtient en 2040 une population d'individus dont on connaît le sexe, le statut familial, le niveau de formation, le secteur d'activité, ainsi que les lieux de travail et de résidence. Chacune de ces données étant stockée à chaque pas de temps, on peut par exemple procéder à des visualisations et représentations de toute sorte.

4.5.3. SIMPOP : un modèle de simulation de l'évolution d'un système de villes

La simulation de la dynamique de l'évolution d'un système de villes est l'objet de SIMPOP. Plus particulièrement, il s'agit de simuler la genèse, le développement et la concentration des fonctions urbaines à différents niveaux durant une longue période (environ 2000 ans) [Bura et *al.*, 1993].

L'environnement est représenté par un ensemble de "places" de tailles et de formes variées (essentiellement des carrées et des hexagones). Elles sont caractérisées par leur nature (plaines, montagnes, mer, marais), leurs ressources naturelles (agriculture, pêche, minerais) ainsi que par des éléments divers tels que la présence d'une voie de communication (rivière, route, etc.). Les ressources correspondent au potentiel qu'une population peut exploiter, la productivité dépendant de facteurs tels que les possibilités techniques ou l'activité du peuplement (dans le modèle, la ville est désignée sous le terme de peuplement) voisin. Chaque ville est modélisée par un agent dont les caractéristiques sont la taille de sa population, sa richesse économique et les fonctions qu'elle possède (agriculture, économie, industrie, administration). Le comportement d'une ville est donné par la somme des comportements de ses habitants. Ces derniers étant représentés par des fonctions économiques correspondant aux principaux groupes sociaux. Les populations rurales sont par exemples associées à la fonction agricole.

Les villes sont donc les principaux agents du système et, du fait qu'elles ne bougent pas, les interactions s'effectuent essentiellement par des flux de biens, de monnaies, de services et d'habitants qui s'expriment sous la forme d'offres et de demandes entre villes. Le résultat est que des villes tendent à grossir et de nombreux phénomènes locaux viennent renforcer les différences apparaissant entre elles de manière à former une hiérarchie de villes relativement à leur taille et leur richesse.

4.5.4. AGENT : un modèle de généralisation cartographique

La généralisation cartographique consiste à transformer de l'information géographique qui correspond à un certain niveau de représentation, en une information (une carte) généralisée qui correspond à un autre niveau de représentation plus abstrait ou schématique.

L'objectif du projet AGENT est de produire un logiciel novateur de conception de carte basé sur la technologie multi agents [Lamy et *al.*, 1999 ; Duchène et Cambier, 2003] reposant sur des interactions bilatérales entre "agents géographiques" (routes et bâtiments) qui sont des objets en provenance d'une base de données géographique.

Les données généralisées sont extraites de zones rurales de la BD Topo, base de données de résolution métrique de l'IGN pour la production des cartes topographiques à des échelles allant de 1 : 25 000 à 1 : 50 000. Le modèle est implémenté de façon à pouvoir traiter les conflits de superposition et proximité entre les routes et les bâtiments, et entre les bâtiments entre eux. Les routes sont fixes, seuls les bâtiments sont mobiles. Trois types de contraintes relationnelles sont considérés : non superposition entre une route et un bâtiment ou entre deux bâtiments, un seuil de proximité (paramètre du modèle) entre deux agents et une contrainte topologique entre un agent route et un agent bâtiment (un bâtiment ne doit pas sauter par-dessus une route). De plus une contrainte interne de précision planimétrique empêche les bâtiments de trop s'éloigner de leur position initiale. Pour atteindre leurs buts (respecter leurs contraintes relationnelles), les routes ont pour comportement de « pousser » les bâtiments, en leur demandant de bouger pour résoudre le conflit. De la même manière, un bâtiment, pour résoudre ses conflits avec les autres bâtiments, les « pousse » en leur demandant de bouger. La priorité est donnée aux conflits de superposition entre routes et bâtiment. Autrement dit, un bâtiment acceptera de s'écarter d'une route même s'il doit pour cela empiéter sur un autre bâtiment (il résoudra ce nouveau conflit dans un deuxième temps en poussant l'autre bâtiment). En revanche, un bâtiment n'accepte jamais de résoudre un conflit avec une route (ou avec un autre bâtiment) si cela suppose de créer un conflit avec une autre route. Les illustrations ci-contre, extraites des articles de Duchène et Cambier [Duchène et Cambier, 2003, *op. cit.* ; Duchène, 2003] dont le premier a fait l'objet d'un prix de la conférence JFSMA'03¹⁶, résument assez bien le comportement des agents du système.

¹⁶ Journées Francophones sur les Systèmes Multi-Agents, édition 2003.



Figure 4.6 : Interaction entre agents route et bâtiment (Extrait de [Duchène et Cambier, 2003, *op. cit.*])

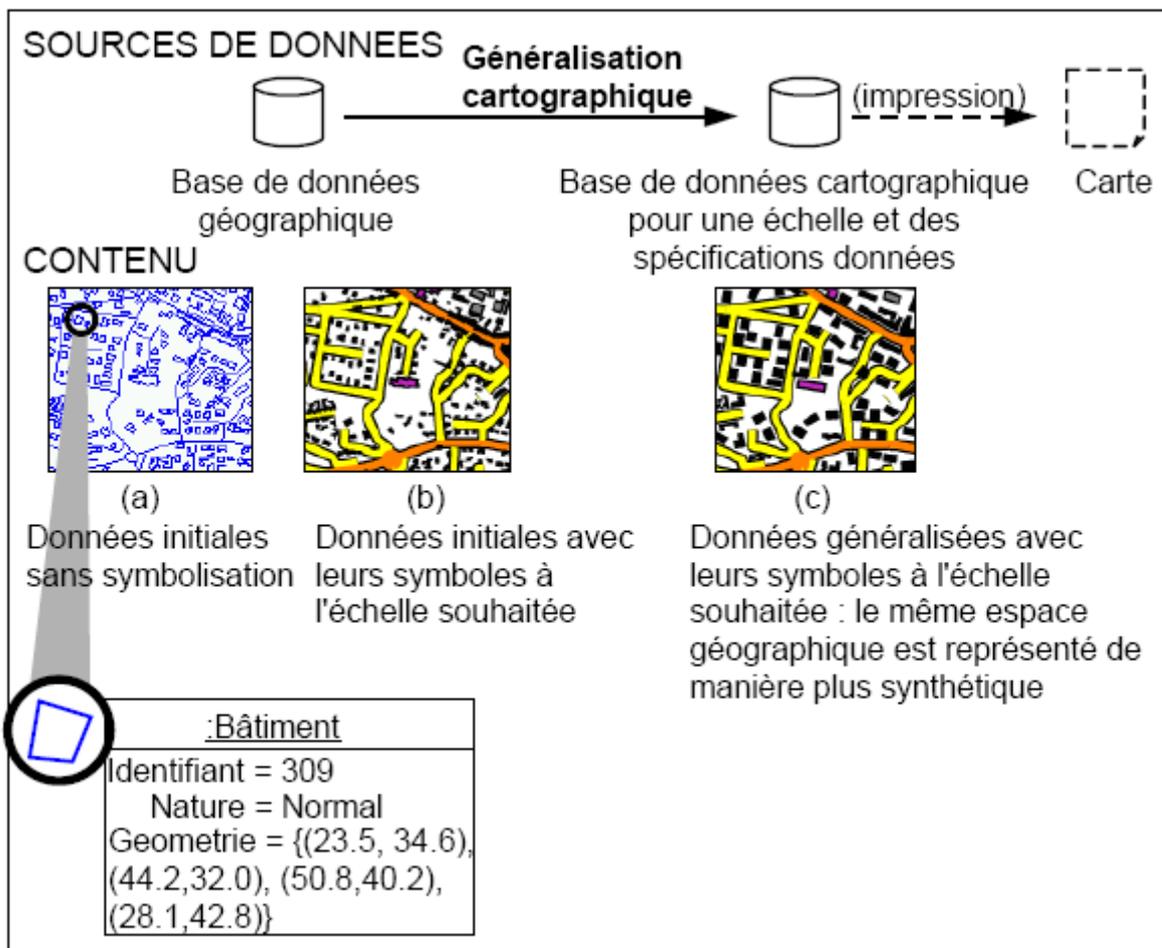


Figure 4.7 : Généralisation cartographique d'une base de données géographique (Extrait de [Duchène, 2003])

L'investissement des SMA dans le monde de la simulation rejoint un courant scientifique beaucoup plus ancien, qui retrouve une nouvelle façon de s'exprimer et de s'actualiser. Ce courant consiste en une approche de la modélisation qui considère directement les entités élémentaires d'un certain niveau d'organisation, pour en décrire les interactions et recomposer à partir d'elles, les dynamiques de niveaux d'organisations supérieurs. En effet, il s'agit des approches particulières en sciences physiques [Hockney et Eastwood, 1998], de modélisations individus-centrées en écologie [Grimm, 1999], ou de microsimulation en démographie ou en géographie [Van Imhoff et Post, 1988] ou d'individualisme méthodologique en sociologie [Dupuy, 1992]. La popularité de ce courant scientifique attentif aux interactions entre entités et aux articulations entre échelles spatio-temporelles est en partie liée aux possibilités simulatoires de l'informatique. Elle bénéficie également des acquis mathématiques et d'un ensemble de réflexions théoriques propres à chaque discipline.

Aussi, l'avantage du recours au paradigme multi agents en simulation urbaine, repose d'abord, sur l'adéquation de la structure des agents avec la conceptualisation de la réalité sous forme d'entités et de processus en interactions. Dans le cadre de notre travail de recherche, la dimension spatiale est modélisée par des agents réactifs que nous assimilons aux automates cellulaires présentés au prochain chapitre.

Bibliographie référencée

- [Agbossou, 2006] I. Agbossou. Modèles d'agents pour la simulation urbaine : méthodologie, architecture et formalisme, XXIIèmes journées de l'Association Tiers-Monde URGENCE, SOLIDARITÉ, GOUVERNANCE ET DÉVELOPPEMENT. ARRAS, 22-24 mai 2006
- [Aschan et al., 2000] C. Aschan, H. Mathian, L. Sanders, K. Mäkilä. A spatial microsimulation of population dynamics in Southern France: a model integrating individual decisions and spatial constraints. In *Applications of Simulation to Social Sciences*. Editions Hermès. Paris, 2000
- [Bazzan et Klügl, 2003] A. Bazzan, F. Klügl. Route Decision Behaviour in a Commuting Scenario: Simple Heuristics Adaptation and Effect of Traffic Forecast. *Euroworkshop on Behavioural Responses to ITS*. Eindhoven, 2003
- [Bensaid, 2003] L. Bensaid. Simulation multi-agent des comportements des consommateurs dans un contexte concurrentiel. Thèse de l'université Pierre et Marie Curie. Paris, juin 2003
- [Bura et al., 1993] S. Bura, F. Guérin-Pace, H. Mathian, D. Pumain, L. Sanders. Multi-Agents Systems and the Dynamics of a Settlement System. In *Simulation Societies Symposium*. Siena, 1993
- [Casare et Sichman, 2005] S. Casare, J.S. Sichman. Towards a functional ontology of reputation. In *International Joint Conference on Autonomous Agents and Multi-Agent Systems AAMAS*, 2005
- [Castelfranchi, 1990] C. Castelfranchi. Social Power : A Point Missed in Multi-Agent, DAI, and HCI. In *Decentralized Artificial Intelligence: Proceedings of the first European Workshop on Modelling Automous Agents in a Multi-agent World (MAAMAWA '89)*. Amsterdam, 1990
- [Collinot et Drogoul, 1996] A. Collinot, A. Drogoul. Application de la méthode Cassiopée à l'organisation d'une équipe de robots. In Actes des 4èmes journées francophones d'intelligence Artificielle et Systèmes Multi-Agents, 1996.
- [Conte et al., 1998] R. Conte, N. Gilbert, J.S. Sichman. MAS and Social Simulation : A Suitable Commitment. MABS'98. Paris, 1998
- [Doran, 2001] J. Doran. Agent-Based Modelling of EcoSystems for Suitable Resource Management. 3rd EASSS'01. Prague, 2001
- [Drogoul, 1993] A. Drogoul. De la simulation multi-agent à la résolution collective de problèmes. Thèse de l'université Paris VI. Paris, novembre 1993
- [Duchène et Cambier, 2003] C. Duchène, C. Cambier. Généralisation cartographique avec des agents qui voient et communiquent. In *Journées Francophones sur les Systèmes-Multi-Agents (JFSMA'03)*. Hammamet, Tunisie, novembre 2003
- [Duchène, 2003] C. Duchène. Coordination multi-agents pour la generalisation automatique. In *Bulletin d'Information de l'IGN, n° 74*, mars 2003
- [Dupuy, 1992] J.P Dupuy. Introduction aux sciences sociales : logique des phénomènes collectifs. Editions, Ellipses, Paris, 1992
- [Edmonds, 2003] B. Admonds. Simulation and Complexity – how they can relate ? In *Virtual World of Precision*, 2003

- [Ferber, 1989] J. Ferber. Objets et agents : une étude des structures de représentation et de communication en IA. Thèse d'Etat, Université de Paris VI, juin 1989
- [Ferber, 1995] J. Ferber Les Systèmes multi-agents. Vers une intelligence collective. IIA. InterEditions, Paris, 1995
- [Folley, 2002] D. Folley. The strange history of the economic agent. *Working paper of the Graduate Faculty of New School University*, 2002
- [Grimm, 1999] V. Grimm. Ten years of individual-based modelling in ecology: what have we learned and what could be learned in the future. In *Ecological Modelling*, vol. 115, 1999
- [Hockney et Eastwood, 1998] R.W. Hockney, J.W. Eastwood. Computer simulation using particles. *Institute of Physics Publishing*. London, 1998
- [Huynh et al., 2006] T.D. Huynh, N. Jennings, N.R. Shadbolt. Certified Reputation: How an Agent can Trust a stranger. *International Joint Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS'06)*. ACM Press, 2006
- [Kruchten, 2000] P. Kruchten. The Rational Unified Process – An Introduction. 2nd edition. Addison-Wesley, 2000.
- [Lamy et al., 1999] S. Lamy, Y. Demazeau, C. Baeijs, M. Jackson, W. Mackaness, R. Weibel. AGENT Project : Automated Generalisation New Technology, 1999. *Disponible sur <http://egent.ign.fr/public/stresa.pdf>* (Consulté le 15.12.2005).
- [Larman, 2003] C. Larman. Agile and Iterative development: A Managers Guide. Editions Addison-Wesley, 2003.
- [Moukas et al., 1998] A. Moukas, K. Chandrinou, P. Maes. Trafficopter : a Distributed Collection System for Traffic Information. CIA'98. Paris, 1998
- [Padgham et Winikoff, 2005] L. Padgham, M. Winikoff. Prometheus: A Practical Agent-Oriented Methodology. In *Agent-oriented methodologies*, Edition Idea Group Publishing, 2005
- [Pàvon et al., 2005] J. Pàvon, J. Gomez-Sanz, R. Fuentes. The INGENIAS methodology and tools. In *Agent-oriented methodologies*, Edition Idea Group Publishing, 2005.
- [Platon et al., 2005] E. Platon, N. Sabouret, S. Honiden. Overhearing and Direct Interactions : Point of View of an Active Environment, a Preliminary Study. *Proceedings of AAMAS Workshop on Environment for Multi-Agent Systems (E4MAS 2005)*, 2005
- [Servat, 2000] D. Servat. Distribution du contrôle de l'action et de l'espace dans les simulations multi-agents de processus physiques. In *JFIADSMA'2000*. Editions Hermès, Paris, 2000
- [Vanbergue et Drogoul, 2002] D. Vanbergue, A. Drogoul. Approche multi-agent pour la simulation urbaine. In *Actes des journées Cassini*, Brest, septembre 2002
- [Van Imhoff et Post, 1988] E. Van Imhoff, W. Post. Méthodes de micro-simulations pour les projections de population. In *Population*, n°4, 1988
- [Zambonelli et al., 2005] F. Zambonelli, N. Jennings, M. Wooldridge. Multi-Agents Systems as Computational Organizations: The Gaia Methodology. In *Agent-oriented methodologies*, Edition Idea Group Publishing, 2005.

5

LES AUTOMATES CELLULAIRES COMME SUPPORT SPATIAL À LA DYNAMIQUE URBAINE

Toute vie surgit d'un centre, puis elle germe et s'épanouit du dedans au dehors.

A. Rodin

Malgré le fait que les automates cellulaires soient bien connus des géographes (notamment les chercheurs qui s'intéressent aux pratiques de modélisation et de simulation), ils présentent des potentialités non encore exploitées. Les automates cellulaires possèdent des caractéristiques communes à certains types d'agents. Il s'agit en l'occurrence des agents réactifs présentés au chapitre précédent dans le paragraphe 4.2.2. A ce titre, les automates cellulaires peuvent facilement s'interfacer avec un modèle exclusivement multi agents dans le cadre de simulations urbaines.

L'un des objectifs de notre travail de recherche est de réussir à réaliser le couplage d'un modèle d'automate cellulaire avec un modèle de système multi agents pour une meilleure représentation du système urbain à simuler. Ainsi, nous appuyant sur les résultats de quelques travaux antérieurs relatifs aux automates cellulaires, nous montrons comment ces derniers pourraient être utilisés pour représenter les différentes occupations du sol dans l'ensemble de la chaîne de modélisation par agents de la dynamique urbaine.

Nous exposons dans ce chapitre les notions d'automate et d'automates cellulaires (AC) ainsi que les concepts clés nécessaires à leur mise en application. Les propriétés communes aux automates cellulaires et aux agents réactifs sont ensuite mises en évidence ; ce qui nous permet d'expliquer la façon dont sera réalisé le couplage SMA-AC. Nous terminons le chapitre avec quelques exemples d'applications de simulations urbaines à l'aide d'automate cellulaire.

5.1. Introduction aux automates

Partant d'une définition intuitive, nous introduisons formellement les automates puis une présentation de quelques unes de ses variantes.

5.1.1. Définition intuitive d'un automate

Selon le petit Robert, le mot "automate" qui dérive du mot grec "*automotos*", signifie "*qui se meut de soi-même*". [...*Toute machine animée par un mécanisme intérieur. Dispositif reliant des algorithmes, des opérations automatiquement enchaînées. Appareil mû par un mécanisme intérieur imitant les mouvements d'un être vivant. Homme qui agit comme une machine sans liberté.*]. Cette définition donne un premier aperçu de la notion d'automate. Mais elle est forcément réductrice en regard des applications scientifiques et technologiques issues des automates.

Un automate peut être défini comme un objet mathématique (abstrait dans ce cas) ou un objet physique (réel dans ce cas : le digicode d'une porte en est un exemple) manifestant un certain nombre de comportements variables. Son changement de comportement est conditionné par un ensemble de lois ou de règles qui le gouvernent. Le digicode d'une porte de sécurité que l'on peut assimiler à un automate, peut classiquement manifester deux comportements possibles dès qu'un usager essaie d'accéder au lieu (bureau, maison, etc.) que protège cette porte : ouvrir la porte ou bien laisser la porte fermée. Il s'agit des deux états possibles de l'automate. Les règles qui le gouvernent sont de la forme : *si* le code d'accès composé par l'usager est correct, *alors* la porte s'ouvre ; *si* le code d'accès composé par l'usager est erroné, *alors* la porte reste fermée.

Il existe deux catégories d'automates : les automates finis et les automates infinis ; mais nos propos concerneront seulement les automates finis car les différentes occupations du sol que nous simulerons constituent un ensemble fini.

5.1.2. Définition formelle d'un automate fini

Les automates finis constituent l'un des modèles de calcul les plus anciens en informatique. La théorie des automates a également connu de grands développements du

point de vue mathématique. En ce sens, les automates permettent de modéliser des “machines” ou des calculs, de manière générale, des systèmes à événements discrets. Pour ce faire, il faudra disposer de l’ensemble des états possibles du système (y compris son état initial) et les transitions atomiques entre états. Le concept d’état renvoie, en pratique, à une configuration donnée du système par l’ensemble des valeurs, à un moment donné, d’un groupe de paramètres. C’est l’abstraction de ce concept vers un élément dans un ensemble fini qui est à la base de la formalisation des automates en tant que machines ayant un nombre fini d’états.

Ainsi, un automate fini est formellement et simplement défini par une structure $\mathcal{A} = (E_0, E, A, R)$ où E_0 désigne l’ensemble des états initiaux, E l’ensemble des états possibles (E_0 est donc un sous-ensemble de E), A l’ensemble des vecteurs¹ d’entrée et R un ensemble de règles obtenues par l’application d’une relation qui prend un élément de $E \times A$ et lui associe un élément de E .

Pour faire simple, un automate fini peut être défini comme étant une machine à états ou un objet mathématique (une fonction par exemple) qui prend en entrée un vecteur de données et produit en sortie un résultat. Les automates finis sont regroupés en deux grandes classes : les automates finis déterministes et non déterministes.

Dans un automate fini déterministe, à chaque état est associée une transition par rapport à tous les éléments de A ; de plus, il ne possède qu’un seul état initial ($E_0 = \{e_0\}$ et $|E_0| = 1$). En revanche, pour un automate fini non déterministe, il peut y avoir des états ne possédant pas de transition ou au contraire, possédant plus d’une transition pour un élément donné de l’ensemble A . Les règles de transition dans ce cas peuvent être de nature probabiliste. En géographie, dans les modèles de simulation à base d’automates cellulaires, on utilise en général des automates finis.

5.2. Réseaux d’automates et automate cellulaire

Dans le contexte de la modélisation, la construction d’un système dynamique est effectuée par un observateur qui isole les objets à étudier et décrit leurs interactions. Classiquement, les systèmes dynamiques fonctionnent en mode continu ou en mode discret. Dans les systèmes dynamiques en mode continu, l’évolution temporelle est décrite avec des valeurs de temps prises dans l’ensemble des nombres réels \mathbb{R} (ou un de

¹ Un vecteur peut être considéré comme une suite ordonnée d’informations ou de données atomiques de nature identique ou différente les unes par rapport aux autres.

ses sous-ensembles). En revanche, en ce concerne les systèmes dynamiques discrets, le temps est une valeur prise dans l'ensemble des entiers naturels \mathbb{N} . Le cadre général dans lequel sont classés les réseaux d'automates est celui des systèmes dynamiques [Wolfram, 2002] permettant de modéliser l'évolution temporelle d'un ensemble d'objets en interaction mutuelle et éventuellement en interaction avec un environnement.

5.2.1. Du réseau d'automates...

Un réseau d'automates est un système formé par plusieurs automates interconnectés entre eux selon une structure d'interaction spécifique. Ce système peut être interprété comme un graphe orienté $G(V, U)$ dont l'ensemble V des sommets serait composé des automates (les nœuds du réseau) et l'ensemble U des arêtes, regrouperait les connexions qui relient une sortie à une entrée (c'est-à-dire un automate à un autre). Un réseau est considéré comme *fermé* dès lors qu'aucune entrée et qu'aucune sortie ne communique avec l'extérieur. Dans le cas contraire, le réseau est dit *ouvert*. A l'instant t , l'état du réseau est donné par la liste des états de l'ensemble des automates qui le composent. C'est ce qu'on appelle *configuration*. Les propriétés d'un réseau d'automates sont donc définies par le mode d'itération (synchrone ou asynchrone), la fonction de changement d'état de l'ensemble des automates (encore appelée fonction de transition) et la structure d'interaction entre ses éléments. La dimension d'un réseau d'automates peut être égale à un, deux ou trois voire plus selon les applications. Par exemple le réseau d'automate unidimensionnel a fait l'objet de nombre de travaux théoriques [Wolfram, 2002, *op. cit.*]. Dans le cadre de notre travail nous nous intéressons seulement aux réseaux d'automates bidimensionnels qui sont beaucoup plus particulièrement appropriés une modélisation spatiale en dimension planaire.

5.2.2. ... à l'automate cellulaire bidimensionnel

Un automate cellulaire (nous utilisons l'expression automate cellulaire sachant que nous lui associons un espace à deux dimensions) est un réseau d'automates à états finis et structurellement identiques entre eux, auquel s'ajoute une propriété de *voisinage*. Le voisinage (nous reviendrons sur le concept de voisinage : cf. §5.3.2.) est le champ d'interaction entre un automate et les autres automates du réseau.

Reprenant les travaux de Langlois [Langlois, 2005] nous pouvons formellement définir un automate cellulaire comme étant un quadruplet (E_0, E, V, f) où E est l'ensemble des états, E_0 l'ensemble des états initiaux (E_0 étant un sous-ensemble de E), V le voisinage et f la fonction de transition. En effet le réseau sous jacent est un maillage (en tant que géographe, on parlerait de carroyage) dont les mailles ou cellules hébergent chacune un automate qui lui est assimilé. Ainsi, il est plus convenable de désigner chaque automate par sa cellule. Le maillage possède une structure qui définit à la fois la forme des cellules et la taille du réseau (nombre de cellules), sa géométrie et sa topologie. La forme des cellules peut être un triangle, un losange, un hexagone ou un carré (c'est la forme géométrique la plus facile d'utilisation voire adaptée). C'est cette forme géométrique que nous utilisons. L'ensemble des cellules constitue le domaine spatial de l'automate cellulaire [Langlois, 2005, *op. cit.*].

5.3. Modélisation par automates cellulaires en géographie

L'étude de la dynamique spatiale constitue un des champs privilégiés de la recherche géographique. Mais face aux limites des approches classiques dont nous avons déjà fait mention au troisième chapitre dans le paragraphe 3.6, la nécessité de recourir à de nouvelles méthodes de modélisations et de simulation se fit sentir très vite dans le domaine de la dynamique urbaine. Les automates cellulaires constituent dans cette perspective l'un des outils ayant conquis nombre de chercheurs en géographie dont les travaux ont contribué à une construction théorique des modèles d'automates cellulaires.

5.3.1. Quelques travaux précurseurs

Le concept d'automate est né dans un contexte où les théoriciens en mathématique et en informatique ambitionnaient de pouvoir coder le raisonnement dans un système général d'axiomes et de règles d'inférence [Fates, 2001]. Von Neumann développa alors une machine virtuelle autoreproductrice, ayant les propriétés d'un calculateur universel comprenant vingt neuf états. Mais, il ne publia pas les résultats de ce travail [Langlois, 2005, *op. cit.*].

En 1970, Martin Gardner publia dans le *Scientific American* les résultats des travaux de John Conway relatifs aux automates cellulaires. Il s'agissait du "Jeu de la vie"

[Berlekamp *et al.*, 1982]. Conway et d'autres chercheurs ont démontré que le jeu de la vie possède aussi les propriétés de calculateur universel. Il est considéré comme étant l'automate cellulaire le plus simple en raison du fait que ses automates ne possèdent que deux états possibles (vie et mort). Nous ne développons pas davantage le modèle mathématique sous jacent car presque tous les travaux en relation avec les automates cellulaires en font déjà référence et ce, de façon approfondie.

En géographie, l'approche des automates cellulaires appliquée à la dynamique spatiale fut pour la première fois, explicitement présentée par Waldo Tobler (*cf.* Encadré 5.1) dans un article [Tobler, 1979] vers la fin des années soixante dix. Il y exposait les principes selon lesquels on pouvait concevoir ce qu'il appelait une "géographie cellulaire". Mais, il a fallu attendre une quinzaine d'années plus tard, pour que Couclelis reprenne les travaux de Tobler dans un cadre conceptuel général indiquant les conditions d'application d'une approche cellulaire permettant la modélisation des phénomènes spatiaux [Couclelis, 1985]. Dès lors, le nombre de travaux de modélisation de la dynamique spatiale s'appuyant sur les automates cellulaires ne cessent de croître aussi bien en apports théoriques qu'en applications réelles [Allen *et al.*, 1986 ; Alligood *et al.*, 1996 ; Langlois et Phipps, 1997, *op. cit.* ; Alves *et al.*, 2002 ; Batty, 1989, 2001 ; Batty et Torrens, 2001 ; Batty *et al.*, 1997 ; Benati, 1997 ; Fates, 2001 ; Dubos-Paillard *et al.*, 2003 ; White et Engelen, 1993, etc.].

5.3.2. Principes de modélisation

La modélisation d'une problématique spatiale par automate cellulaire nécessite un travail d'analyse préalable d'identification et de mise en évidence de l'ensemble des caractéristiques fonctionnelles du problème à traiter. Conformément à la définition formelle d'un automate cellulaire proposée par Langlois et Phipps [Langlois et Phipps, 1997, *op. cit.*], ces caractéristiques doivent obéir aux conditions et principes de modélisation d'un automate cellulaire : l'espace cellulaire, les états, le voisinage, la configuration initiale, les règles de transition, les modes d'itération (déterministe ou stochastique, synchrone ou asynchrone), et la procédure générale.

5.3.2.1. L'espace cellulaire

L'espace cellulaire correspond à la zone d'étude à laquelle doit être superposé un carroyage. En effet, le carroyage permet de subdiviser le terrain d'étude en de petites mailles appelées "cellules" selon une résolution spatiale relative à la thématique étudiée et le niveau de précision voulu. La résolution spatiale désigne les dimensions (longueur et largeur ou côté selon que la forme géométrique des mailles est un rectangle ou un carré) des cellules. Plus la résolution spatiale est fine, meilleure est la précision des analyses.

5.3.2.2. Les états

Dans les applications géographiques des automates cellulaires, chaque cellule matérialise une occupation du sol qui correspond à un état. L'ensemble des états possibles de chaque cellule est donc un sous ensemble de toutes les occupations du sol identifiées pour la thématique étudiée.

5.3.2.3. Le voisinage

Les concepts de proximité et de contiguïté spatiale en géographie sont pris en compte au travers du concept de voisinage dans les automates cellulaires. Pour une cellule donnée, le voisinage permet de définir avec précision l'ensemble des autres cellules avec lesquelles elle peut entrer en interaction. Cette précision s'obtient par le biais de la topologie dans un certain rayonnage (un ou deux selon le type de voisinage) autour de la cellule considérée. Il existe classiquement cinq types de voisinages : voisinage de Von Neumann (a), voisinage de Moore (b), voisinage de Von Neumann déplacé (c), voisinage de Moore Von Neumann (d) et le voisinage en H (e) tels que présentés sur la figure ci-contre.

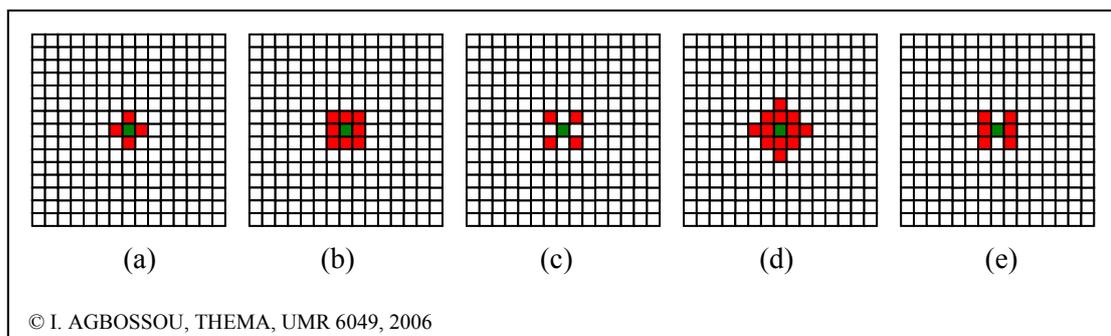


Figure 5.1 : *Quelques voisinages usuels*

Les deux voisinages de bases les plus significatifs sont ceux de Moore et de Von Neumann. Les autres sont obtenus par des combinaisons de ces derniers. Pour une cellule donnée, le voisinage de Von Neumann (a) considère ses voisins comme étant l'ensemble des cellules de premier rang situées de part et d'autre de chaque côté (Nord, Sud, Est et Ouest). Le voisinage de Moore (b) considère les cellules de premier rang situées de part et d'autre des quatre côtés et sommets de la cellule cible (il s'agit du voisinage de Von Neumann complété par les cellules Nord-Est, Nord-Ouest, Sud-Est et Sud-Ouest).

En respect du "principe de cohérence de voisinage" qui s'énonce comme suit : « *Dans un système de cellules interactives, l'état réalisé dans une cellule tend à s'imposer aux cellules du voisinage.* » [Phipps, 1989], le voisinage de Moore se prête mieux aux modélisations urbaines ; et c'est celui que nous utilisons dans le cadre de ce travail. En effet, lorsqu'une cellule x matérialise un état e_i , elle interagira avec les autres cellules de son voisinage V de façon à augmenter la probabilité pour que celles-ci occupent le même état e_i . Inversement, chaque cellule v du voisinage V interagira de la même façon avec x en tendant à imposer son propre état à cette dernière.

5.3.2.4. La configuration initiale

Elle désigne la configuration spatiale de départ pour la simulation. Cette configuration est définie par l'occupation du sol (état initial) de toutes les cellules dont l'ensemble matérialise la zone d'étude (l'espace cellulaire). Elle est obtenue, en général, selon un *pattern*² défini *a priori* de façon empirique conformément à la réalité qui est modélisée.

5.3.2.5. Les règles de transition

Elles expriment les conditions sous lesquelles chacune des cellules peut changer d'état d'une configuration à l'autre entre deux pas de simulation. Les conditions précisent également quels états peuvent transiter vers quels autres états.

² La notion formelle de *pattern* prend sa source dans les modèles de construction architecturale de Christopher Alexander [Alexander et al., 1977]. Un *pattern* est un modèle de conception au sens d'un artefact. Il permet d'associer un nom et une forme aux heuristiques abstraites aux règles et aux bonnes pratiques techniques ou scientifiques. C'est donc une description nommée d'un problème et d'une solution susceptible d'être appliquée dans de nouveaux contextes. Dans l'idéal, le *pattern* fournit, en complément, des conseils sur la façon dont il peut être utilisé dans des situations variées, et présente également ses points forts et ses contre-indications. En clair, le recours à un *pattern* évite au concepteur ou au modélisateur de ne pas chercher à réinventer la roue.

5.3.2.6. Les modes de transition

La transition se fait d'abord au niveau de chaque cellule, en fonction des règles établies et du type de voisinage considéré, puis au niveau global (à l'échelle du terrain d'étude). Elle peut être déterministe ou stochastique. En mode déterministe, toutes les configurations possibles à chaque itération sont connues à l'avance. En effet, le nouvel état occupé par chaque cellule à une prochaine itération peut être connu en fonction des règles à appliquer. Le jeu de la vie est un exemple d'automate cellulaire déterministe. En mode stochastique, les règles de transition sont probabilistes. La détermination de l'état d'une cellule au temps t est assujettie à une probabilité p de sorte que la somme de toutes les probabilités de toutes les cellules en interaction soit égale à l'unité. Si plusieurs cellules satisfont aux conditions pour être choisies, la sélection peut s'opérer au moyen d'un générateur pseudo-aléatoire [Fleury et *al.*, 2007] sur l'ensemble des cellules candidates. Il n'est donc pas possible de prédire de façon exacte, au temps $t - \delta t$, la configuration du système au temps t . L'automate cellulaire mis en œuvre dans notre travail est de type probabiliste. La transition est également relative à la gestion du temps : modes synchrone ou asynchrone (*cf.* Chapitre 3, §3.5.3.2.).

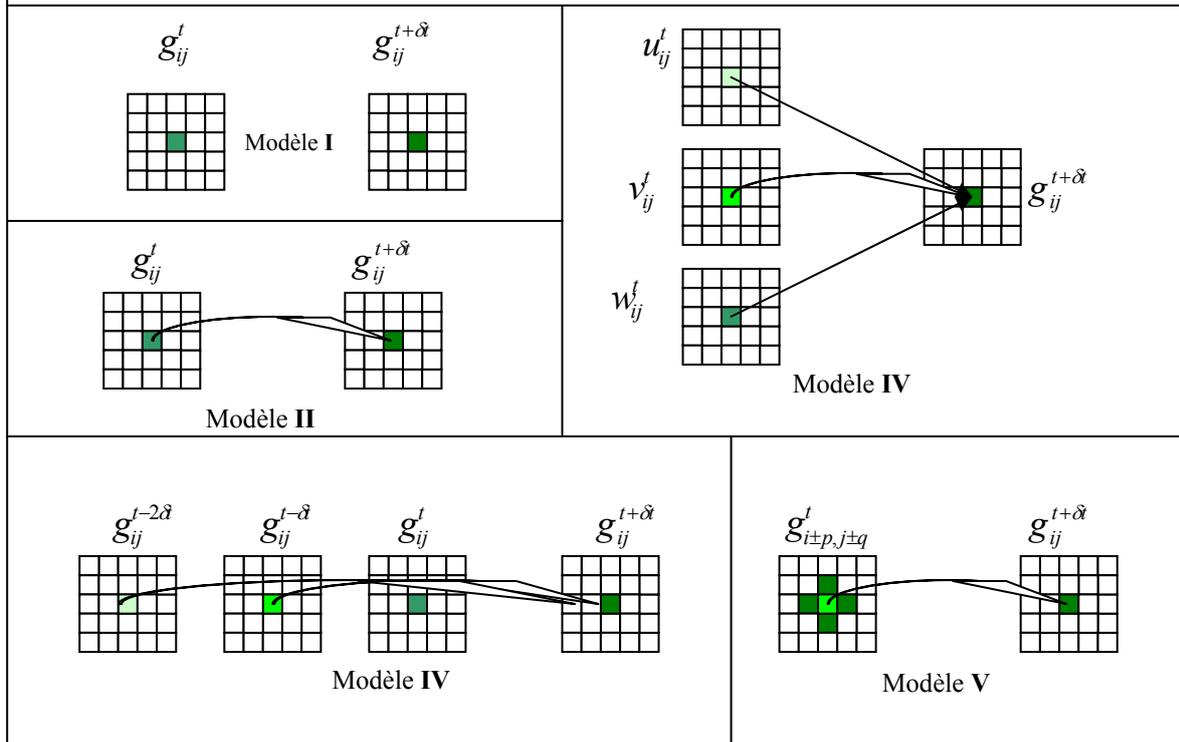
5.3.2.7. La procédure générale

Elle précise l'enchaînement de l'ensemble des événements devant gouverner la simulation. Au début de la simulation ($t = 0$) la définition des états initiaux permet d'obtenir la configuration initiale. Les règles et mode de transition ainsi que le pas de temps sont précisés. A chaque itération ($0 < t < t + \delta t$), les états des cellules sont mis à jour et engendrent une nouvelle configuration. Dans le cas des automates cellulaires stochastiques, les diverses probabilités de transition sont d'abord calculées puis s'effectue la mise à jour des états.

Encadré 5.1

Dans son article de 1979 [Tobler, 1979, *op. cit.*], Waldo Tobler a présenté les différentes modalités sous lesquelles peuvent être conduites des transitions dans un automate cellulaire à visée géographique.

Pour illustrer le principe des transitions des cellules d'une occupation du sol au temps t à une autre au temps $t+\delta t$, il posa que si g_{ij}^t est la catégorie d'occupation du sol d'une cellule localisée par ses coordonnées i (abscisse) et j (ordonnées) dans l'espace cellulaire au temps t , et que $g_{ij}^{t+\delta t}$ est l'occupation du sol de cette même cellule, à un autre temps (le moment $t+\delta t$), alors cinq possibilités *primitives* de modification de l'occupation du sol peuvent apparaître. Il s'agit des cinq modèles représentés ci-contre.



Le modèle indépendant (I): $g_{ij}^{t+\delta t}$ est aléatoire et ne dépend aucunement de g_{ij}^t .

Le modèle dépendant (II): l'occupation du sol au temps $t+\delta t$ de la cellule ij dépend de l'occupation du sol précédente au même endroit c'est-à-dire que $g_{ij}^{t+\delta t} = F(g_{ij}^t)$.

Le modèle historique (III): l'occupation du sol en ij au temps $t+\delta t$ dépend des occupations du sol antérieures au même endroit. $g_{ij}^{t+\delta t} = F(g_{ij}^t, g_{ij}^{t-\delta t}, g_{ij}^{t-2\delta t}, \dots, g_{ij}^{t-k\delta t})$

Le modèle multi variables (IV): l'occupation du sol en ij dépend de nombreuses autres variables présentes en ij , et pas seulement de l'occupation du sol. $g_{ij}^{t+\delta t} = F(u_{ij}^t, v_{ij}^t, w_{ij}^t, \dots, z_{ij}^t)$. Dans ce cas, l'état pris par chaque cellule est matérialisation d'une combinaison de plusieurs autres variables exprimant chacune une réalité différente

Le modèle géographique (V): l'occupation du sol en ij au temps $t+\delta t$ dépend non seulement de l'occupation du sol au temps t en ij mais aussi des occupations du sol au temps t en d'autres lieux. $g_{ij}^{t+\delta t} = F(g_{ij}^t, u_{i\pm p, j\pm q}^t)$ Dans ce modèle, le concept de voisinage est implicitement pris en compte.

Pour W. Tobler, ces cinq modèles sont évidemment des abstractions simplistes, et c'est certainement en les combinant (notamment, le second et les deux derniers) que l'on procédera à une simulation urbaine plus réaliste.

5.3.3. De la prise en compte de l'aléatoire : les processus de Markov

Attribuée principalement au mathématicien russe Andrej Andreevic Markov, une chaîne de Markov est «*Un processus dont les probabilités de transition sont des probabilités conditionnelles au passé*» [Berchtold, 1998]. Selon le Petit Robert (1993), «*une probabilité est le caractère de ce qui est probable, c'est-à-dire ce dont on peut penser que l'existence, la réalisation, a eu, a ou aura lieu ; qu'il est raisonnable de conjecturer, de présumer, de prévoir*». Les chaînes Markov appartiennent à la famille des processus stochastiques et expriment l'état d'une variable à l'époque t en fonction d'un certain nombre d'observations passées de cette même variable. Dans un espace discret comme celui d'un automate cellulaire, les chaînes de Markov finies discrètes permettent de modéliser les probabilités de transition d'un état à un autre. Ainsi, comme l'a souligné Jen [Jen, 1990], la mise en œuvre d'une chaîne de Markov «*[...] nécessite un vecteur de faits mobiles dont l'observation est exprimée en valeurs relatives de leur masse, d'une matrice de transition où sont exprimées les probabilités de déplacement des différents groupes d'observations, d'un endroit vers un autre et d'un opérateur de transformation diachronique, en l'occurrence une multiplication matricielle à itération.*».

Le fait d'introduire les calculs de probabilités de transition d'un état vers un autre par le biais de la modélisation markovienne permet de contrôler la stochasticité du système lors des itérations grâce aux propriétés mathématiques des processus de Markov [Guttorp, 1995].

5.3.4. Articulation entre automate cellulaire et système multi agents

Les rapports entre automates cellulaires et intelligence artificielle, réseaux neuronaux en particulier, ont été explorés sous divers angles. Bien que ces deux types de modèles diffèrent par leurs organisations topologique et fonctionnelle (surtout en ce qui concerne les règles de transition), Garzon [Garzon, 1990] a comparé les potentiels de calcul de plusieurs adaptations des automates cellulaires aux réseaux de neurones (réseaux discrets synchrones et réseaux d'automates). Il en conclut à une similitude des potentialités. De même en géographie, Cocu et Caruso ont montré la similitude et la complémentarité entre SMA et AC [Cocu et Caruso, 2002, *op. cit.*]. Par ailleurs, Badariotti et Weber ont aussi mis en évidence la similitude entre SMA et AC au travers de deux applications de simulation de la mobilité résidentielle dans la ville de Bogotá [Badariotti et Weber, 2002].

La première est un *automate cellulaire* basé sur des stocks de logements, à pas de temps non uniforme. Le principe repose sur la similarité des comportements de groupes sociaux (c'est-à-dire une homogénéité des modalités de choix pour des groupes similaires du point de vue démographique et économique). Les zones où l'état d'occupation du stock de logements est inférieur à un moment donné à son optimum agissent comme des attracteurs ; parallèlement, les groupes d'individus (cohorte) issus des cellules denses s'adaptent à cette situation par un mouvement de mobilité qui se reporte sur ces zones. Le déplacement s'établit par contiguïté (voisinage). La seconde application est un modèle *multi agents* qui introduit les individus (ou groupe d'individus) caractérisés par des comportements particuliers et des critères de choix résidentiels différents. Plusieurs règles de fonctionnement cognitif et de préférence individuelle sont introduites dans la simulation ; il en est de même pour les lieux, à savoir les logements et les zones d'habitation. Le critère de choix se fonde sur une évaluation des descripteurs offerts par chaque zone et sur une confrontation avec les critères dégagés par chaque individu.

Prenant comme appui les résultats de ces différents travaux, notamment ceux de Dijkstra [Dijkstra et al., 2000] où sont présentés les résultats théoriques d'un modèle multi agents à base d'automates cellulaires pour la visualisation d'activités pédestres nous pensons que le couplage d'un SMA et d'un AC dans une seule et même application de simulation de la dynamique urbaine, peut être très fécond en termes d'approches conceptuelles, de méthodologie et de résultats scientifiquement probants. En effet, il est d'ores et déjà acquis que les automates cellulaires sont un excellent outil de représentation de la dimension spatiale. Or, dans la plupart des applications multi agents, l'environnement fournit le contexte spatial des agents. Il devient dès lors possible de modéliser l'environnement d'un SMA par un automate cellulaire. Le système urbain étant en définitive une combinaison non linéaire des hommes, de l'espace et du temps (le temps joue le rôle de ciment entre les hommes et l'espace), le modéliser revient à représenter les hommes par des agents cognitifs et l'espace par un automate cellulaire que nous considérons comme un ensemble d'agents réactifs (*cf.* Chapitre 4, §4.2.2.). La figure 5.2 donne l'illustration du couplage SMA-AC.

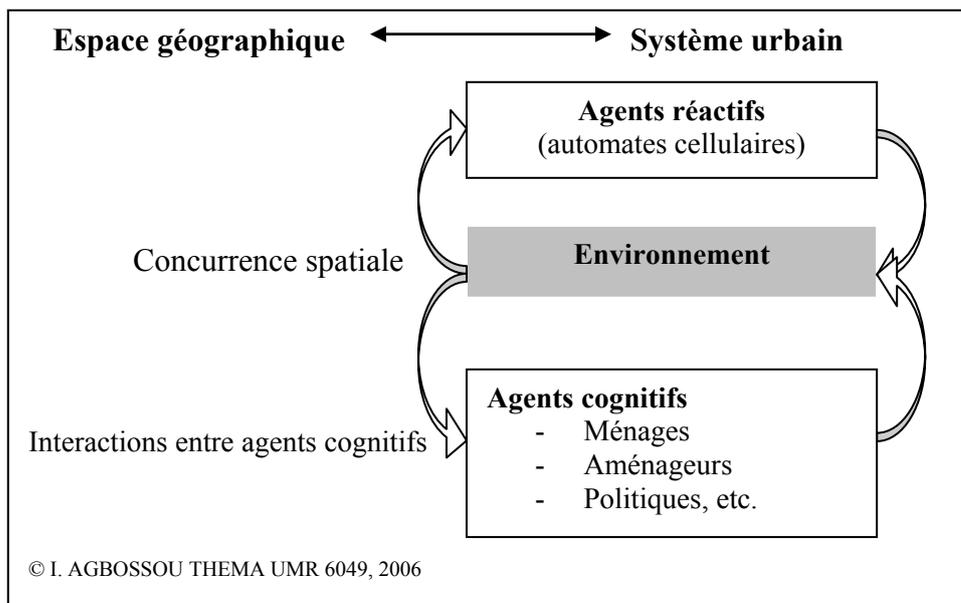


Figure 5.2 : *Couplage conceptuel SMA-AC*

L'environnement est principalement caractérisé par les règles de transition qui sont dictées par le comportement des agents cognitifs. Ceci implique qu'il est capable non seulement d'évoluer en fonction des comportements des agents mais, il peut également contraindre par effet rétroactif les décisions de ces derniers.

5.4. Quelques exemples d'applications géographiques des automates cellulaires

Nous présentons ici quelques exemples de modèles d'automates cellulaires urbains. L'objectif n'est pas de faire un état de l'art exhaustif du domaine, mais d'exposer le principe de quelques modèles fondateurs dont les résultats constituent un acquis scientifique en ce qui concerne notre travail de recherche. Il s'agira successivement du modèle de Batty et Xie développé dans le contexte de la transformation de l'espace urbain du Nord-Est de l'Amérique du Nord, du modèle proposé par Portugali et Benenson simulant les transformations de l'espace résidentiel urbain en Israël, du modèle de White et Engelen sur la modélisation de dynamique régionale et enfin du modèle SpaCelle développé par l'équipe du laboratoire MTG-Rouen de l'UMR 6063. Une des applications de SpaCelle porte sur la simulation de l'évolution de l'espace urbain rouennais de 1950 à 1994 [Dubos-Paillard et *al.*, 2003, *op. cit.*].

5.4.1. Le modèle de Batty et Xie

Dans le modèle cellulaire de Batty et Xie [Batty et Xie, 1994 ; Batty, 1998], l'espace urbain est représenté par un ensemble de cellules ayant chacune deux états possibles : état 1 pour une cellule occupée et état 0 pour une cellule qui n'est pas occupée. Une cellule occupée peut redevenir inoccupée : c'est le principe de réversibilité. Le modèle général est caractérisé par trois fonctions principales à savoir la capacité des états à persister, la capacité des états à se multiplier et la fonction de localisation du lieu de croissance dans le cas où un état se multiplie.

$E_{ij}^t = \{0, 1\}$ désigne les états possibles de la cellule ij au temps t .

$P^t = \sum e_{ij}^t$ désigne la population de cellules occupées au temps t .

$P^{t+1} = P^t (1 + \beta - \delta)$ désigne la population des cellules occupées au temps $t+1$, où β et δ sont respectivement les taux d'apparition et de disparition de l'état 1 pour l'ensemble du système.

La capacité des états à persister est définie par $e_{ij}^{t+1} = \text{Integer}[e_{ij}^t * (1 + \sigma - \text{random}(1))]$ où $\sigma = 1 - \delta$ est le taux de persistance de l'état 1 et $\text{random}(1)$ un générateur de nombre pseudo-aléatoire pris dans l'intervalle $]0, 1[$.

La capacité des états à se multiplier est définie par $b_{ij}^{t+1} = \text{Integer}[e_{ij}^t (1 + \beta - \text{random}(1))]$ où β est le taux de croissance de l'état 1 . Ce potentiel de croissance favorise la multiplication effective selon le voisinage de la cellule au temps t . La notion de voisinage de ce modèle est définie par un emboîtement d'échelles à trois niveaux. Le niveau approprié où doit se trouver le lieu de croissance est obtenu à partir d'une probabilité exprimée en fonction de la distance d_{ijkl} qui sépare la cellule source ij de la cellule cible kl . Ce modèle a été appliqué avec succès à Savannah en Georgie [Batty et Xie, 1994, *op. cit.*] ainsi qu'à Buffalo (New York) [Xie, 1994].

5.4.2. Le modèle de Portugali et Benenson

Le modèle proposé par Portugali et Benenson [Portugali et Benenson, 1994, 1995, 1997 ; Portugali *et al.*, 1994, 1997] permet la simulation de l'évolution d'une ville soumise à un double processus de migration : une migration interne et une migration externe. Ce modèle appelé City-1 dont la version City-2, en cours de développement [Benenson, 1999, 2001, 2004] évolue vers un modèle multi agents, visait surtout à simuler le

changement de l'espace résidentiel des villes israéliennes soumises à un important processus d'immigration en provenance des pays de l'Europe de l'Est.

Le modèle consiste en un automate cellulaire A défini par un réseau cellulaire rectangulaire C_{ij} de dimension $m \times n$. L'état d'une cellule C , au temps t , est noté $H_t(C)$. Chaque cellule peut prendre cinq états possibles : *vide*, *migrant interne ségréatif*, *migrant interne neutre*, *migrant externe ségréatif* ou *migrant externe neutre*. La dynamique de A est gouvernée par un ensemble de règles de transition $T(A)$ basé sur l'état actuel et l'état des cellules du voisinage de C noté $U(C)$. Ces règles spécifient pour chaque cellule, les probabilités de transition de son état actuel à chacun des autres états possibles du système. Elles sont regroupées en trois sous-ensembles selon le rôle qu'elles jouent. Les deux premiers groupes de règles précisent les probabilités pour qu'une cellule libre devienne occupée (par un migrant interne ou un migrant externe) alors que le dernier groupe de règles précise les probabilités pour qu'une cellule occupée se libère. L'évolution de l'organisation spatiale des états dans l'espace cellulaire est donc régie par trois matrices de probabilités : une matrice carrée de taille 5 (car les transitions se font entre cinq états possibles) à diagonale supérieure nulle et deux matrices carrées de taille 5 à diagonale inférieure nulle. Voyons concrètement la forme de ces matrices.

La matrice spécifiant les probabilités pour qu'une cellule occupée se libère est de la

$$\text{forme : } \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ p_{10} & 1 - p_{10} & 0 & 0 & 0 \\ p_{20} & 0 & 1 - p_{20} & 0 & 0 \\ p_{30} & 0 & 0 & 1 - p_{30} & 0 \\ p_{40} & 0 & 0 & 0 & 1 - p_{40} \end{bmatrix} \text{ avec } P_{i0} = f[U(C), R(a, b, c)].$$

$U(C)$ étant le voisinage et R une fonction de répulsion contrôlée par les paramètres a, b et c tenant compte des caractéristiques (migrants internes et externes, comportement ségréatif ou neutre) de la population habitant le voisinage de la cellule de départ.

La matrice spécifiant les probabilités pour qu'une cellule libre devienne occupée par les

$$\text{migrants internes est de la forme : } \begin{bmatrix} q_{00} & q_{01} & q_{02} & q_{03} & q_{04} \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

avec $q_{0i} = f[U(C), g(a, b, c)]$, g étant une fonction d'attraction contrôlée par les paramètres a, b et c tenant compte des caractéristiques (migrants internes et externes,

comportement ségrégatif ou neutre) de la population habitant le voisinage de la cellule d'arrivée.

La matrice spécifiant les probabilités pour qu'une cellule libre devienne occupée par les migrants externes est de la même forme que la matrice précédente mais les probabilités d'arrivée dépendent de fonctions spécifiques à la migration externe.

En effet, chacune des matrices synthétise les informations nécessaires à l'écriture des règles probabiliste de transitions entre les cinq états possibles.

5.4.3. Le modèle de White et Engelen

Le modèle ISLAND proposé par Roger White et Guy Engelen [White et Engelen, 1993, *op. cit.*, 1994, 1997, 2000] est un modèle cellulaire contraint défini sur un espace non homogène. Son objectif est de simuler une dynamique plus régionale que spécifiquement urbaine. Il s'agit d'un modèle contraint dans le sens où la dynamique des états possibles du système est gouvernée par un modèle macro scalaire. Les données d'utilisation du sol proviennent d'une base de données qui est gérée par un système d'information géographique (SIG). Au total, ISLAND est un modèle de simulation cellulaire composé de trois sous modèles.

- ◆ Le SIG gère les informations de départ, c'est-à-dire la configuration initiale. Il permet en particulier, de déterminer l'état initial des cellules en adaptant l'information spatiale à la résolution spatiale de l'automate cellulaire. Il permet également de déterminer les surfaces potentielles des différentes formes d'utilisation du sol.

- ◆ L'automate cellulaire prend en entrée les diverses occupations du sol considérées comme états accessibles aux cellules. L'évolution du système se fonde alors sur le calcul, pour chaque cellule, d'un vecteur de probabilité matérialisant son degré d'interaction avec les autres cellules. Pour ce faire, entrent en ligne de compte la propension de la cellule à prendre un état donné défini par le SIG, l'effet de son voisinage et une perturbation aléatoire. Ce vecteur noté P de dimension n (c'est-à-dire le nombre d'états possibles) est exprimé sous la forme $P = SN + \varepsilon$ où :

ε est un facteur d'ajustement ;

S est un vecteur de dimension n donnant la propension des états à être occupés par une cellule quelconque. En fait c'est le potentiel d'une cellule à occuper un certain état ;
 N est une matrice diagonale de dimension $n \times n$ donnant sur la diagonale l'effet de

voisinage pour chacun des états possibles dans une cellule donnée selon la fonction

$$N_{ii} = \sum_d \sum_k (w_{z,y,d})(I_{d,k}) \text{ avec :}$$

N_{ii} l'effet de voisinage pour l'état i ;

$W_{z,y,d}$ un paramètre qui spécifie le poids des cellules du voisinage en fonction de leur état y et de leur distance d à la cellule centrale ;

$I_{d,k} = 1$ si la cellule k , à une distance d , occupe l'état y , sinon $I_{d,k} = 0$.

◆ Le sous modèle macro scalaire permet de déterminer les conditions régionales de la demande exprimant les états possibles (les différentes occupations du sol) du système. Ce sous modèle intègre trois autres modules dont l'utilisation combinée varie en fonction des régions d'application. Il s'agit d'un module environnemental, d'un module démographique et d'un module économique. Si par le biais du module environnemental l'utilisateur précise les hypothèses de modélisation concernant les changements climatiques, le taux de croissance de la population est donné par le module démographique en fonction des migrations et de la mortalité. Le module économique permet de relier les principaux secteurs d'activités en termes d'entrées et de sorties (input/output).

Les auteurs ont expliqué dans un de leurs papiers [Engelen, et al., 1995] que « [...] la relative facilité de calibration de ce type de modèle permet d'engendrer des configurations spatiales proches de la réalité. ». La vue d'ensemble de l'architecture du modèle ISLAND est illustrée à la figure 5.3.

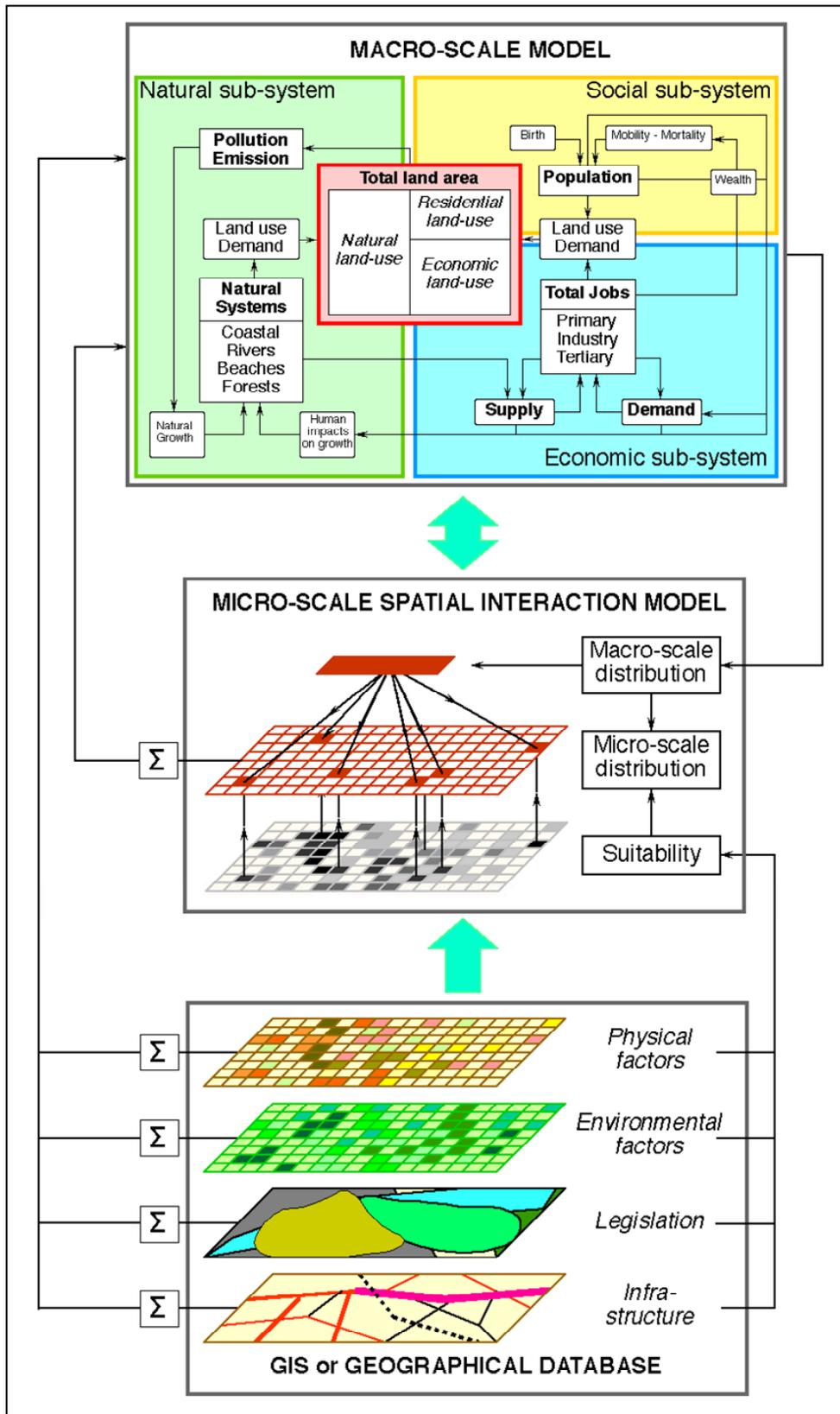


Figure 5.3 : Vue d'ensemble de l'architecture de ISLAND (Extrait de [Engelen, et al., 1995])

5.4.4. Le modèle SpaCelle

SpaCelle (Système de Production d'Automate CELLulaire Environnemental) est une plate-forme logicielle de modélisation générique par automate cellulaire développée à l'Université de Rouen sous la direction de P. Langlois. SpaCelle permet non seulement de reproduire le jeu de la vie mais également de modéliser de réels phénomènes urbains. Pour ce faire, l'utilisateur doit définir la configuration initiale, par saisie ou importation des états des cellules, ainsi que les règles de transition du modèle qu'il saisit dans un éditeur de texte intégré. Ces règles constituent la base de connaissances de la dynamique du modèle. Il doit aussi définir la géométrie du domaine (la zone d'étude), la forme des cellules (carré ou hexagone) et le mode de fonctionnement global des cellules (synchrone ou asynchrone).

Chaque cellule (encore appelée individu) est caractérisée par une variable d'état qualitatif et son *âge* à partir duquel est calculé sa *force de vie*. En effet, pour chaque cellule, le changement d'état est qualifié de *naissance*. La force de vie est donc une fonction probabiliste exprimant la chance d'une cellule de maintenir son état au prochain pas de simulation. La durée de vie des individus est régie par une fonction aléatoire gaussienne définie par une espérance de vie et un écart-type qui est propre à sa classe (l'ensemble des individus ayant le même état X). Chaque individu possède une durée maximale de vie (*AgeMax*) qui lui est donnée à sa naissance, en fonction de l'espérance et de l'écart-type de sa classe. Si les conditions d'environnement (le voisinage) sont défavorables, il peut mourir prématurément. A chaque instant, un individu possède une force de vie (lui permettant de conserver son état X à l'instant suivant) définie par $F(X > X) = 1 - \frac{Age}{AgeMax}$.

Lorsque la force de vie d'un individu est épuisée, celui-ci meurt et se transforme dans un autre état Z qui est propre à sa classe. A chaque instant t , tout individu dans un état $E(t) = X$ peut se transformer, selon les conditions, en un autre état, $E(t+1) = Z$, parmi différents états possibles, Z_1, Z_2, \dots, Z_k . Si l'individu reste en vie, alors $E(t+1) = E(t)$. Pour chaque transition $X > Z_i$ la force de transition $F(X > Z_i)$ est définie par une moyenne pondérée de produits d'interactions élémentaires P_i . La pondération permet de donner plus ou moins d'importance à chaque interaction dans sa contribution à la force de

transition $F(X > Z_i) = \frac{\sum_{i=1}^k \lambda_i P_i}{\sum_{i=1}^k \lambda_i}$ où $P_i = \prod_{j=1}^{k_i} F_j(Y_j, R_j)$, R_j le rayon du voisinage, Y_j le nombre

de cellules présentes dans le voisinage de rayon R_j et $F_j(Y_j, R_j)$ une fonction d'interaction relative au type de voisinage.

Dans [Dubos-Paillard et al., 2003, *op. cit.*], les auteurs de ce modèle ont présenté les résultats de son application à l'espace rouennais. Ces résultats expriment bien le degré de réalisme du modèle. La figure 5.4 donne une vision comparative de la réalité et des résultats de simulation de l'espace rouennais en 1994.

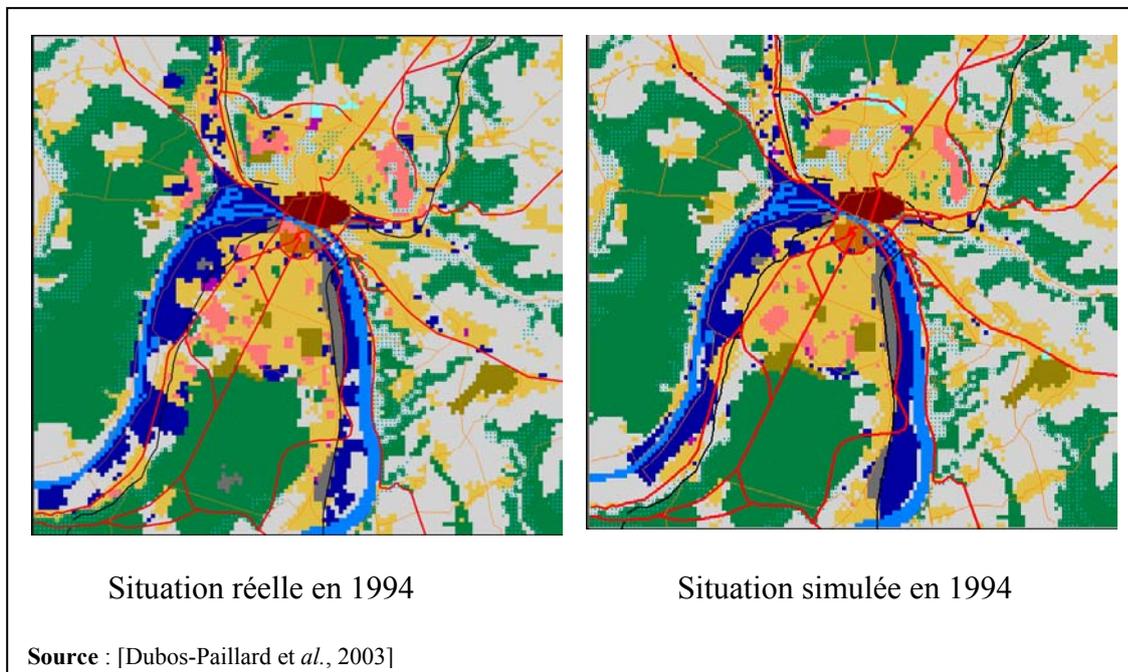


Figure 5.4 : Résultats de simulation en 1994 de l'évolution de l'espace rouennais depuis 1950 avec SpaCelle (Extrait de [Dubos-Paillard et al., 2003])

En somme, il existe plusieurs façons de modéliser les dynamiques urbaines. Dans la lignée des travaux qui prennent appui sur les acquis de l'intelligence artificielle et de l'intelligence artificielle distribuée, d'aucuns utilisent les approches par agents au sens des SMA et d'autres utilisent les approches par automate cellulaire.

Mais une des questions principales qui nous occupent est : *comment parvenir à concevoir des modèles un peu plus réalistes afin d'explorer et de proposer des scénarios d'aménagement probants et dépourvus le plus possible de toutes considérations utopiques ?*

En raison de l'état actuel des connaissances et des divers travaux de recherche en modélisation et de simulation urbaine dont nous avons déjà fait mention, notre réponse s'oriente vers un modèle intégré où les comportements humains doivent être représentés par le biais d'agents cognitifs et l'espace géographique par des agents réactifs que nous assimilons aux automates cellulaires.

L'élaboration concrète d'un tel modèle intégré est le cœur de la troisième partie de notre travail de thèse. Et la thématique d'application associée est la mobilité résidentielle à l'échelle urbaine.

Bibliographie référencée

[Alexander et al., 1997] C. Alexander, S. Ishikawa, M. Silverstein. A Pattern. Language-Towns-Building-Construction. Oxford University Press, 1997

[Allen et al., 1986] P. M. Allen, G. Engelen, M. Sanglier. Self-organizing systems and the 'laws of socio-economic geography'. In *European Journal of Operational Research*, 1986

[Alligood et al., 1996] K. Alligood, D. Sauer, A. Yorke. Chaos-An Introduction to Dynamical Systems. New York. Springer, 1996

[Alves et al., 2002] S. Alves, M. Oliveira Neto, M. Martins. Electoral surveys' influence on the voting processes : a cellular automata model. *Pysica*, 2002

[Badariotti et Weber, 2002] D. Badariotti, C. Weber. La mobilité résidentielle en ville. Modélisation par automates cellulaires et système multi-agents à Bogota. *L'espace géographique* n°2, 2002

[Batty, 2001] Models in planning : technological imperatives and changing roles. In *International Journal of applied Earth Observation and Geoinformation*, 2001

[Batty et Torrens, 2001] M. Batty, M. Torrens. Modeling complexity : the limits to prediction. In *CyberGeo* n°201, 2001

[Batty, 1998] M. Batty. Urban evolution on desktop: simulation with the use of extended cellular automata. In *Environment and Planning A* 30, 1998

[Batty et al., 1997] M. Batty, H. Couclelis, E. Eichen. Urban systems as cellular automata. In *Environment Planning B-Planning & Design*, 1997

[Batty et Xie, 1994] M. Batty, Y. Xie. From Cells to Cities. In *Environment and Planning B* 21, 1994

[Benati, 1997] S. Benati. A cellular automaton for the simulation of competitive location. In *Environment and Planning B-Planning & Design*, 1997

[Benenson, 2004] I. Benenson. Agent-based modelling : from individual residential choice to urban residential dynamics. In *Spatially Integrated Social Science: Examples in Best Practice*. Oxford University Press. Oxford, 2004

[Benenson, 2001] I. Benenson. OBEUS : Object-Based Environment for Urban Simulation. 6th *International Conference on GeoComputation*. University of Queensland, Brisbane, Australia, 2001. Disponible sur <http://www.geocomputation.org/2001/papers/benenson.pdf> (Consulté le 23.05.2006)

[Benenson, 1999] I. Benenson. Modeling population dynamics in the city: from a regional to multi-agent approach. In *Discrete Dynamics in Nature and Society* n°3, 1999

[Dubos-Paillard et al., 2003] E. Dubos-Paillard, Y. Guermond, P. Langlois. Analyse de l'évolution par automate cellulaire. Le modèle SpaCelle. In *L'espace géographique* n°4, 2003

[Engelen, et al., 1995] G. Engelen, R. White, I. Uljee, P. Drazan. Using Cellular Automata for Integrated Modelling of Socio-environmental Systems. In *Environmental Monitoring and Assessment* n°34, 1995

- [Fates, 2001] N. Fates. Les automates cellulaires : vers une nouvelle épistémologie ?. Mémoire de DEA. Paris-I, 2001. Disponible sur <http://nazim.fates.free.fr/Epistemo/Epistemo.html> (consulté le 07.09.2006)
- [Fleury et al., 2007] G. Fleury, P. Lacomme, A. Tanguy. Simulation à événements discrets. Modèles déterministes et stochastiques. Exemples d'applications implémentés en Delphi et en C++. Editions Eyrolles, Paris 2007
- [Garzon, 1990] M. Garzon. Cellular automata and discrete neural networks. *Physica*, n°45, 1990
- [Guttorp, 1995] P. Guttorp. Stochastic Modelling of scientific Data. Edition Chapman an Hall. London, 1995
- [Jen, 1990] E. Jen. A periodicity in one-dimensional cellular automata. In *Physica D*, n°45, 1990
- [Phipps, 1989] M. Phipps. Dynamical Behavior of Cellular Automata under the Constraint of Neighborhood Coherence. In *Geographical Analysis n°21*, 1989
- [Portugali et Benenson, 1997] J. Portugali et I. Benenson. Human agents and global forces in a self-organising city. In *Self-Organization of Complex Structures: From Individual to Collective Dynamics*. London, 1997
- [Portugali et Benenson, 1995] J. Portugali et I. Benenson. Artificial planning experience by means of a heuristic sell-space model: simulating international migration in the urban process. In *Environment and Planning B 27*, 1995
- [Portugali et Benenson, 1994] J. Portugali et I. Benenson. Competing order parameters in a sel-organizing city. In *Managing and Maketing of Urban Development and Urban Life*. Berlin, 1994
- [Portugali et al., 1997] J. Portugali et I. Benenson, I. Omer. Spatial cognitive dissonance and sociospatial emergence in self-organizing city. In *Environment and Planning B-Planning & Design*, 1997
- [Portugali et al., 1994] J. Portugali et I. Benenson, I. Omer. Socio-spatial residential dynamics : stability and instability within a self-organized city. In *Geographical Analysis n°26*, 1994
- [Tobler, 1979] W. Tobler. Cellular geography. In *Philosophy in geography*. Reidel Pub, Dordrecht, Holland, 1979
- [White et Engelen, 2000] R. White et G. Engelen. High-resolution integrated modelling of the spatial dynamics of urban and regional systems. In *Computers, Environment and Urban Systems n°24*, 2000
- [White et Engelen, 1997] R. White et G. Engelen. Cellular automata as the basis of integrated dynamic regional modelling. In *Environment and Planning B-Planning & Design*, 1997
- [White et Engelen, 1994] R. White et G. Engelen. Urban Systems Dynamics and Cellular-Automata—Fractal Structures between Order and Chaos. In *Chaos Solitons & Fractal n°4*, 1994
- [White et Engelen, 1993] R. White et G. Engelen. Cellular automata and fractal urban form: a cellular modelling approach to the evolution of urban land-use patterns. In *Environment and*

Planning A n°25, 1993

[Xie, 1994] Y. Xie. Analytical Models and Algorithms for Cellular Urban dynamics. Thèse de doctorat de State University of New York at Buffalo. Buffalo, 1994

Partie III

RÉALISATION & APPLICATION D'UN MODÈLE DE SIMULATION DE LA DYNAMIQUE URBAINE : *VisualSimores*

Dans cette partie,

**Chapitre 6 : Modélisation du comportement des agents et de la
dynamique résidentielle**

**Chapitre 7 : Résultats de l'application du modèle de
simulation**

6

MODÉLISATION DU COMPORTEMENT DES AGENTS ET DE LA DYNAMIQUE RÉSIDEN TIELLE

Si le secret du fonctionnement du vivant se trouve dans sa structure, le secret de sa structure se trouve dans la logique qui a présidé à son élaboration.

J. Piaget

Dans les chapitres précédents, nous avons mis en évidence les déterminants de la mobilité résidentielle. Nous avons également vu que les agents résidentiels (les ménages) sont caractérisés par des propriétés que nous avons organisées en six variables (statut d'occupation, le revenu, le niveau d'études, l'âge, la composition du ménage et les réseaux de relations sociales). Pour chaque agent, la combinaison de ces différentes variables agit sur le comportement résidentiel à chaque étape de la vie. ***Comment formaliser la structuration de ces variables afin de proposer un modèle permettant d'inférer le comportement résidentiel des agents ?*** Deux types d'approches permettent de répondre à cette interrogation. D'une part, les méthodes statistiques car elles sont précisément conçues pour permettre le passage de l'observation à la loi. Et d'autre part, les méthodes issues de l'intelligence artificielle, parce que leur vocation est de permettre aux ordinateurs de traiter des connaissances probabiliste, logique ou factuelle. La combinaison de ces deux approches est possible grâce au formalisme des réseaux bayésiens.

En effet, les réseaux d'inférence bayésiens sont le résultat d'une convergence entre ces deux disciplines et constituent l'un des formalismes les plus complets et cohérents pour l'acquisition, la représentation et l'utilisation des connaissances par des ordinateurs [Naïm, et al., 2004 ; Cornuéjols et al., 2002 ; Xiang, *op. cit.*, 2002] mais aussi pour le

calcul de probabilités conditionnelles. Dans le cadre de notre recherche, les réseaux sont utilisés pour modéliser la mémoire décisionnelle des ménages quant à ce qui concerne leur comportement de mobilité.

Après avoir présenté les cadres théoriques et méthodologiques de la mise en œuvre des réseaux d'inférence bayésiens, nous réalisons dans ce chapitre le modèle comportemental des agents résidentiels avant de dresser de façon détaillée l'algorithme régissant le comportement dynamique des agents durant la simulation.

6.1. Considérations théoriques relatives aux réseaux bayésiens

A la fois outil mathématique de calcul de probabilités conditionnelles et modèle de représentation graphique de connaissances, les réseaux d'inférence bayésiens ou plus simplement réseaux bayésiens doivent leurs noms aux travaux de Thomas Bayes au XVIII^{ème} siècle sur la théorie des probabilités. Ils sont actuellement le résultat des recherches effectuées dans les années 80 par J. Pearl [Pearl, 1986a, 1986b, 1987, 1988] à UCLA (University of California, Los Angeles) et une équipe de recherche danoise de l'université d'Alborg. Encore du domaine de la recherche dans les années 90, ils connaissent maintenant de plus en plus d'applications concrètes par exemple le contrôle de véhicules autonomes ou le diagnostic médical ou encore la fouille de données, la reproduction du raisonnement et du langage, etc.

Les réseaux bayésiens sont des modèles qui permettent de décrire des relations de probabilités conditionnelles entre des faits. Cette représentation repose sur un graphe orienté sans cycle (DAG : *directed acyclic graph*) dans lequel chaque nœud, c'est-à-dire chaque variable du *monde* modélisé, possède une table de probabilité conditionnelle et où chaque arc représente une dépendance directe entre les variables reliées. L'ensemble du réseau représente alors la distribution des probabilités jointes de l'ensemble des variables de manière compacte, en s'appuyant sur les relations d'indépendance conditionnelle entre nœud. A ce titre, les réseaux bayésiens conjuguent deux aspects : une partie qualitative modélisée au moyen d'un graphe et une partie quantitative exprimée par le biais de probabilités (*cf.* Figure 6.1). Les réseaux bayésiens s'appuient donc sur la théorie des graphes et la théorie des probabilités.

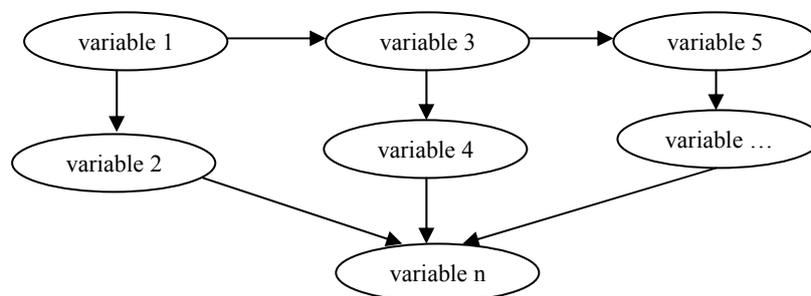


Figure 6.1 : Représentation graphique d'un réseau bayésien à n variables

6.1.1. Les graphes orientés sans cycle

L'idée de base de la théorie des graphes est de proposer un outil de manipulation et d'étude d'un ensemble fini d'objets sur lequel est défini une relation binaire quelle que soit la sémantique de cette relation. La théorie des graphes se donne donc pour objectif d'étudier de manière abstraite un type de structure d'ensemble qui ne dépend que d'une relation binaire entre ses éléments. Les graphes peuvent être alors interprétés comme une description des relations entre paires d'éléments. Le caractère abstrait d'une telle description permet à cette théorie d'avoir des champs d'applications extrêmement vastes et variés. Par exemple, elle est souvent utilisée pour l'analyse des réseaux de villes en géographie [Mathis, 2003].

L'objectif de cette section n'est pas de présenter la théorie des graphes dans son ensemble mais simplement de décrire les diverses notions indispensables à une bonne compréhension du modèle décisionnel des agents que nous allons développer.

6.1.1.1. Notion de graphe

Un graphe est un ensemble de couples d'éléments vérifiant une relation donnée. Cet ensemble peut être fini ou non. Mais en l'occurrence nous nous intéressons uniquement aux ensembles finis car le nombre de variables que nous avons identifiées dans le chapitre précédent pour caractériser les agents résidentiels est fini.

Soit $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ un ensemble fini non vide. Un graphe G sur V est défini par la donnée du couple $G = (V, E)$ où $E \subset \{(u, v) \mid u, v \in V \text{ et } u \neq v\}$. V est alors nommé l'ensemble des nœuds de G . E peut être donc considéré, par extension, comme étant la description de la relation entre chaque paire de nœuds. L'écriture $u \neq v$ interdit l'existence d'une relation réflexive. En effet, certaines définitions acceptent (u, u) comme couple dans E ; ce qui n'est pas notre cas parce qu'aucune variable ne sera en relation avec elle-même. Les distinctions fondamentales entre les divers types de graphes dépendent de la nature exacte des éléments de E c'est-à-dire la nature des relations entre chaque paire de nœuds.

6.1.1.2. Notion d'arc

La notion d'orientation est très importante lorsqu'on utilise des modèles abstraits comme les graphes. Lorsque nous considérons par exemple l'ensemble des villes françaises reliées par autoroute, la relation entre chaque paire de villes est clairement symétrique (*double sens*). En revanche, dans le cas d'un automate, ce n'est pas parce que celui-ci peut passer d'un état A à un état B qu'il pourra passer de B à A (les transitions possibles entre A et B peuvent donc être à *sens unique*). Dans ce cas la relation est qualifiée d'*arc* et dans le cas inverse, elle est qualifiée d'*arête*.

Soit un graphe $G = (V, E)$. Pour tout élément (u, v) de E ,

- (u, v) est un arc et noté $(u \rightarrow v)$ si et seulement si $(v, u) \notin E$,
- (u, v) est une arête et notée $(u - v)$ si et seulement si $(v, u) \in E$.

Comme défini, un arc n'apparaît qu'une seule fois dans E pour chaque paire de nœuds (u, v) de V . Les arcs et les arêtes permettent de définir et de manipuler de façon homogène les graphes orientés, et non orientés. Les graphes orientés constituent le socle des modèles bayésiens et de ce fait, sont le type de graphe qui nous intéresse.

6.1.1.3. Les graphes orientés et quelques notions connexes

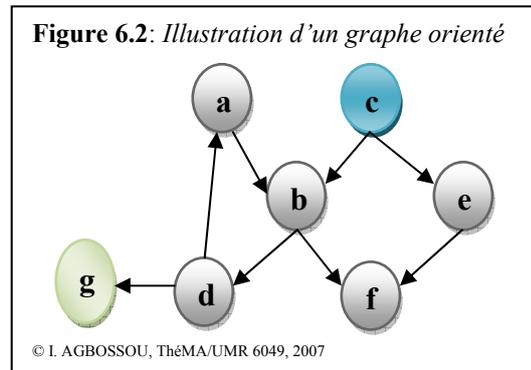
Un graphe $G = (V, E)$ est un graphe orienté noté \vec{G} si et seulement si tous les éléments de E sont des arcs. Ainsi, $\vec{G} = (V, E)$ où $E \subset \{(u, v) \mid u, v \in V, u \neq v \text{ et } (u \rightarrow v)\}$. Pour tout arc $(u \rightarrow v)$ appartenant à E , u est l'*origine* de l'arc et v son *extrémité*. On dit que u est un *parent* (ou *prédécesseur*) de v et v , l'*enfant* (ou *successeur*) de u . Nous noterons Γ_v l'ensemble des parents de v et Ξ_u l'ensemble des enfants de u . De même, on pourra définir l'ensemble des parents ou des enfants d'un sous-ensemble A de V :

- $\Gamma_v = \{u \in V \mid (u \rightarrow v) \in E\}$
- $\Gamma_A = \{u \in V \setminus A \mid \exists v \in A, (u \rightarrow v) \in E\}$
- $\Xi_u = \{v \in V \mid (u \rightarrow v) \in E\}$
- $\Xi_A = \{v \in V \setminus A \mid \exists u \in A, (u \rightarrow v) \in E\}$.

$V \setminus A$ étant l'ensemble V privé des éléments de A .

Dans le graphe \vec{G} , un nœud sans parent est appelé *racine* et un nœud sans enfant est appelé *feuille*. Dans la figure 6.2, nous pouvons avoir les illustrations suivantes :

- $\vec{G} = \{\{a, b, c, d, e, f, g\}, \{(a, b), (b, d), (b, f), (c, b), (c, e), (e, f), (d, a), (d, g)\}\}$
- $\Gamma_b = \{a, c\}$
- $\Xi_b = \{d, f\}$
- $\Gamma_{\{a,b,e\}} = \{d, c\}$
- le nœud c est une racine,
- le nœud g est une feuille.



6.1.2. Les probabilités

Les réseaux bayésiens ont la particularité d'allier deux champs différents des mathématiques dans le but de représenter le manque d'information : la théorie des graphes d'une part, qui fournit le cadre nécessaire pour une modélisation qualitative des connaissances ; et la théorie des probabilités d'autre part, qui permet d'introduire une information quantitative dans les connaissances.

6.1.2.1. Notions de probabilité et de variable aléatoire

La théorie des probabilités propose un cadre mathématique pour représenter quantitativement l'incertain. La présentation que nous allons en faire est forcément tronquée puisqu'elle est orientée vers son utilisation dans le domaine des réseaux bayésiens. En particulier, l'espace sur lequel seront définies les probabilités restera discret et fini. Ce n'est bien sûr pas le cas général mais c'est suffisant pour le développement des modèles que nous allons élaborer.

Soit Ω un ensemble fini non vide, $(\mathcal{E}, \cap, \cup)$ une algèbre c'est-à-dire un triplet offrant la possibilité de faire des calculs sur Ω où \mathcal{E} est un sous-ensemble de l'ensemble des parties de Ω ($\mathcal{E} \subset 2^\Omega$, l'ensemble des parties de Ω ou encore univers). Soit $P: \mathcal{E} \rightarrow [0, 1]$ une fonction à valeurs réelles. P est une probabilité sur (Ω, \mathcal{E}) si et seulement elle vérifie :

- $\forall \mathcal{A} \in \mathcal{E}, 0 \leq P(\mathcal{A}) \leq 1 ;$

- $\forall \mathcal{A}, \mathcal{B} \in \mathcal{E}, [\mathcal{A} \cap \mathcal{B} = \phi] \Rightarrow P(\mathcal{A} \cup \mathcal{B}) = P(\mathcal{A}) + P(\mathcal{B}); \mathcal{A} \text{ et } \mathcal{B} \text{ sont des ensembles mutuellement exclusifs, } \phi \text{ étant l'ensemble vide ;}$
- $P(\Omega) = 1 \text{ et } P(\phi) = 0.$

Tout élément de \mathcal{E} est appelé *évènement élémentaire* sur Ω . Un *évènement* sur Ω est donc une sous-partie de Ω c'est-à-dire une combinaison d'évènements élémentaires. Ω est appelé l'*évènement certain* et ϕ l'*évènement impossible*.

Une variable aléatoire permet de caractériser des évènements (qui sont des sous-ensembles d'évènements élémentaires) par une simple valeur. C'est donc une fonction χ définie sur Ω comme suit :

$$\chi : \begin{cases} \Omega & \rightarrow \mathcal{D}_\chi \\ \omega & \mapsto \chi(\omega) \end{cases}$$

Pour $x \in \mathcal{D}_\chi$, on note alors $\{\chi = x\}$ l'évènement $\{\omega \in \Omega | \chi(\omega) = x\}$, \mathcal{D}_χ étant le domaine de définition de χ . Si le domaine de définition de la variable χ est fini, alors χ est une *variable aléatoire discrète*. Comme nos modèles sont restreints à un Ω fini, les variables seront donc toujours considérées comme discrètes.

Dans la suite, nous allons représenter une variable aléatoire par une lettre majuscule (A, B, ...). La valeur que prend cette variable aléatoire sera notée par la même lettre mais en minuscule (a, b, ...). De même nous noterons P(a) la probabilité que l'évènement A prenne la valeur a ($\{A = a\}$).

6.1.2.2. Notions de probabilité jointe et de probabilité marginale

Une variable aléatoire est donc un moyen pour condenser une information pertinente sur un univers (ensemble des possibilités). Cependant, il faut souvent plus d'une variable aléatoire pour caractériser l'état de l'univers. Nous assimilons ici, l'univers au système cognitif décisionnel de l'agent résidentiel. Il est pratique de décrire ce système grâce à un ensemble de variables permettant de le caractériser à tout moment.

Pour ce faire, il faut lui adjoindre une probabilité sur les différentes variables qui permettent de décrire et de caractériser son état à un moment précis. Cette *probabilité jointe* est construite à partir de la même fonction de probabilité sur $\Omega : P$. La liste des arguments (c'est-à-dire les évènements sur lesquels porte la probabilité) d'une probabilité jointe est donc suffisante pour la caractériser. Ainsi, la probabilité que les évènements A, B, C et D prennent respectivement les valeurs a, b, c et d est notée

$P(a, b, c, d)$. Plus généralement, si U est un ensemble fini non vide de variables aléatoires discrètes ($U = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$) sur Ω , U est appelé le vecteur état du système. Réciproquement, la donnée d'une probabilité jointe d'un ensemble de variables permet de retrouver la probabilité jointe de chacun de ces sous-ensembles. C'est ce qu'on appelle une *probabilité marginale*. L'opération qui permet d'obtenir les probabilités marginales est la fonction *marginalisation* de P sur V (V étant un sous-ensemble de U) définie comme par : $\forall V \subset U, P(V) = \sum_{x \in U \setminus V} P(V, x)$. Dans l'illustration ci-contre,

$P(t, l)$	l_1	l_2	$P(t)$
t_1	0.0578	0.0782	0.136
t_2	0.1604	0.0576	0.218
t_3	0.5118	0.1342	0.646
$P(l)$	0.73	0.27	

nous mettons en évidence le calcul des probabilités marginales sur les variables aléatoires T et L fictives dont les modalités ou valeurs sont respectivement t_1, t_2, t_3 et l_1, l_2 . Les

valeurs numériques sur fond gris clair représentent les probabilités jointes et celles sur fond gris foncé sont les probabilités marginales. En effet, $P(l_1) = P(L = l_1, T = t_1, T = t_2, T = t_3)$.

6.1.2.3. De la probabilité conditionnelle au théorème de Bayes

Une autre notion fondamentale en calcul des probabilités est celle de *probabilité conditionnelle*. En réalité, pour un évènement ω de l'univers Ω , la valeur $P(\omega)$ est associée au moins implicitement à des conditions de réalisation. Si A et B sont deux variables aléatoires, l'expression d'une probabilité conditionnelle de A par rapport à B se traduit par « étant donné que l'évènement $B = b$ s'est produit, la probabilité que l'évènement $A = a$ se produise (ou se soit produit) est k » et s'écrit $P(a | b) = k$ et se lit « probabilité de a sachant b égale à k ». Cette définition permet d'arriver naturellement au théorème de Bayes [Naïm, et al., 2004, *Op. cit.*] que nous démontrons en annexe 1:

$$P(a, b) = P(a|b).P(b) = P(b|a).P(a) \quad (6.1)$$

En transformant (6.1), on obtient $P(a|b) = \frac{P(b|a).P(a)}{P(b)}$ (Bayes 1)

Plus généralement, $P(a|b, c) = \frac{P(b|a, c).P(a|c)}{P(b|c)}$ (Bayes 2)

Ce théorème est à la base de tout un pan de la statistique nommé, de manière assez compréhensible, la statistique bayésienne. Sans entrer dans les détails, dans l'équation (Bayes 1), le terme $P(a)$ est la probabilité *a priori* de A . Elle est « antérieure » au sens qu'elle précède toute information sur B . $P(a)$ n'est rien d'autre que la probabilité

marginale de A. Le terme $P(a|b)$ est appelée la probabilité *a posteriori* de A sachant B (ou encore de A sous condition B). Elle est « postérieure », au sens qu'elle dépend directement de B. Le terme $P(b|a)$, pour un B connu, est appelée la fonction de *vraisemblance* de A. De même, le terme $P(b)$ est appelé la probabilité marginale ou a priori de B. C'est pourquoi le théorème de Bayes s'écrit aussi :

$$\mathbf{loi\ a\ posteriori\ \cong\ loi\ a\ priori\ \times\ vraisemblance\quad (Bayes\ 3).}$$

La statistique bayésienne est donc une approche qui tend à automatiser l'application de la loi a priori sur des quantités inconnues, quitte à effectuer une mise à jour, principalement grâce à l'équation (Bayes 3), lorsque plus de renseignements auront été récoltés.

La généralisation de la loi fondamentale (6.1) permet de calculer la probabilité jointe de plusieurs variables aléatoires à partir de leurs probabilités conditionnelles :

$$P(x_1, x_2, x_3, x_4) = P(x_1|x_2, x_3, x_4) * P(x_2|x_3, x_4) * P(x_3|x_4) * P(x_4) \quad (6.2)$$

D'après l'équation (6.2), on voit que la manipulation des probabilités jointes sur plusieurs variables est une tâche ardue qui implique des algorithmes de complexité exponentielle, en fonction du nombre de variables.

Pour rendre possibles les calculs sur de telles probabilités, on recourt à la notion d'indépendance conditionnelle. En effet, cette notion permet la simplification du second membre de l'équation (6.2). Concrètement, elle consiste à éliminer le calcul des probabilités conditionnelles des variables dont la connaissance n'apporte aucune information supplémentaire. De ce fait, dans le cas d'une application basée sur des données d'enquête, il devient alors possible d'approcher les probabilités marginales par les moyennes statistiques.

P. Frankhauser avait, pour preuve, démontré de façon formelle dans sa thèse de doctorat [Frankhauser, 1991] le passage de la moyenne statistique de données d'observation au calcul de probabilité.

Ainsi, en nous appuyant sur les conclusions de P. Frankhauser, lorsque deux variables X et Y sont conditionnellement indépendantes on a :

$$P(X|Y) \cong \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N P_i(X = x|Y = y) * P(Y)$$

En effet, le théorème de Bayes est utilisé dans l'inférence statistique pour mettre à jour ou actualiser les estimations d'une probabilité, à partir des observations et des lois de probabilité de ces observations.

Contrairement à l'école "fréquentiste" qui utilise les propriétés de long terme de la loi des observations sans prendre en considération la variabilité des paramètres, l'école "bayésienne" utilise les probabilités comme moyen de traduire numériquement un degré de connaissance, en l'occurrence approximée par la moyenne statistique (la théorie mathématique des probabilités n'oblige en effet nullement à associer celles-ci à des fréquences, qui n'en représentent qu'une application particulière résultant de la loi des grands nombres). Dans cette optique, le théorème de Bayes peut s'appliquer à toute proposition, quelle que soit la nature des variables et indépendamment de toute considération ontologique.

6.2. Formalisation du modèle comportemental des agents

La mobilité résidentielle est une problématique vaste et complexe. Sa complexité vient du fait qu'il ne s'agit pas d'étudier seulement les trajectoires résidentielles des ménages ou les mutations du parc de logements, mais l'évolution du couple ménages-logements au sein du système résidentiel (*cf.* Figure 2.2).

6.2.1. Revisite du système résidentiel

Dureau et Flores définissent le système résidentiel individuel comme «*la configuration spatio-temporelle définie par l'ensemble des logements habités par un individu au cours de l'année, l'intensité et le rythme de résidence dans chacun d'eux* ». [Dureau, 1999 ; Dureau et Flores 2000]. Reprenant cette définition, nous l'étendons au ménage (agent résidentiel) en élargissant la dimension temporelle à l'espérance de vie de ce dernier ou au nombre d'années passées de façon continue dans la zone géographique considérée.

En clair, nous considérons le système résidentiel du ménage comme étant la configuration spatio-temporelle définie par les logements habités par un ménage au cours de sa vie ou pendant une certaine durée dans un espace géographique bien précis. En l'occurrence, l'espace géographique est délimitée par la zone d'étude. La mobilité spatiale vue comme tout changement de logement sera formalisée dans le cadre de la

mobilité urbaine. Ces déplacements par changement de logements ont des conséquences directes sur la dynamique urbaine. On aurait pu complexifier le système en complétant la figure 2.2 par les acteurs de la politique de l’habitat urbain. La dynamique du système est régie par les diverses interactions entre deux grandes entités : les habitants représentés par les agents résidentiels (ménages) et l’habitat représenté par les logements. Chaque type de ménage est modélisé au travers d’agent cognitif et l’habitat par l’automate cellulaire. La modélisation du volet spatial par automate cellulaire et son couplage avec le SMA est détaillée à la section 6.3. Il s’agit maintenant de voir comment on va exploiter ce système résidentiel pour arriver à une modélisation comportementale des agents résidentiels.

6.2.2. L’inférence comportementale des agents

Un modèle bayésien permet de représenter un ensemble de variables aléatoires pour lesquelles on connaît (ou lorsqu’il est possible de définir la structure du réseau à partir d’un algorithme d’apprentissage) l’ensemble des dépendances. Appliqué aux ménages, ce modèle permet d’inférer de façon dynamique (mise à jour des connaissances d’un ménage à chaque étape de son cycle de vie) le comportement des ménages quant à leur décision de changer de résidence et le choix du type de logement à occuper. La construction d’un tel modèle se décompose en trois étapes distinctes : une représentation qualitative des relations de causalité existantes entre les variables aléatoires, la définition des tables de probabilités jointes puis la spécification numérique des probabilités conditionnelles.

6.2.2.1. Spécification du graphe causal

Dans le quatrième chapitre nous avons présenté l’architecture d’un agent BDI (cf. Figure 4.2). Dans cette représentation, la base de connaissances est le siège de l’inférence cognitive du ménage. Et nous faisons l’hypothèse qu’avant de prendre une quelconque décision de déménagement, le ménage va d’abord évaluer sa satisfaction résidentielle. Le processus aboutissant à une telle évaluation est modélisé par le graphe causal ci-dessous.

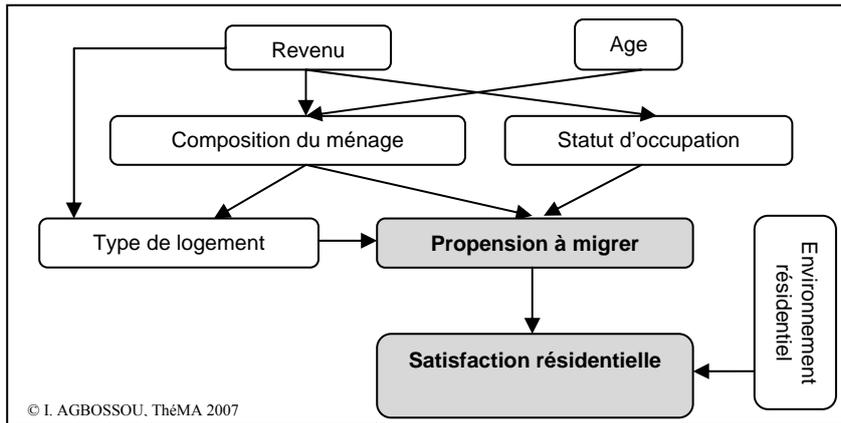


Figure 6.3 : Graphe causal de la base de connaissances du ménage

Ce graphe illustre donc la première étape consistant à modéliser qualitativement le raisonnement d'un ménage (où chaque flèche matérialise un lien de dépendance directe), en amont, quant à une éventuelle possibilité et décision de changer de logement. Il permet également de mettre en évidence les influences entre les variables. La prochaine étape est la définition du *schéma d'inférence* c'est-à-dire les probabilités jointes.

6.2.2.2. Spécification du schéma d'inférence

La spécification probabiliste du réseau d'inférence passe par une représentation utilisable d'une distribution jointe sur l'ensemble des variables. Ainsi, la décomposition de la distribution de probabilité jointe peut se faire en s'appuyant sur l'équation (6.2) :

$$P(\chi_1, \dots, \chi_n) = \prod_{i=1}^n P(\chi_i | \Gamma_{\chi_i}) \text{ où } \Gamma_{\chi_i} \text{ est l'ensemble des parents de } \chi_i. \quad (6.3)$$

Chaque χ_i représente une variable c'est-à-dire chaque nœud du graphe causal de la figure 6.3. Comme le réseau encode la distribution de probabilité jointe pour l'ensemble des variables, il permet donc de calculer n'importe quelle probabilité d'intérêt c'est-à-dire la probabilité de réalisation d'un évènement quelconque. La décomposition est toujours la même et permet de ne spécifier que des probabilités locales, c'est-à-dire les probabilités d'une variable sachant uniquement les variables ayant une influence directe sur elle.

6.2.2.3. Quantification des probabilités conditionnelles

Cette étape consiste à spécifier les tables de probabilité $P(\chi_i|\Gamma_{\chi_i})$ pour chaque variable de la base de connaissances de l'agent. Ceci revient à donner l'ensemble des probabilités de la variable pour chacune de ses valeurs possibles sachant chacune des valeurs de ses parents. Par exemple la variable “*composition du ménage*” possède deux variables parents : *revenu* et *âge*. Ainsi, la quantification de la probabilité conditionnelle $P(\text{composition du ménage} = \text{personne seule} | \text{revenu} = 1000 \text{ €}, \text{âge} > 35 \text{ ans})$ par exemple nécessite non seulement la disponibilité des tables de probabilité des trois variables mais aussi les tables de probabilités de chacune des trois variables conditionnellement aux deux autres.

Ces probabilités peuvent être données par un expert ou bien apprises à partir d'un corpus d'exemples (ce qui nécessite le développement d'algorithmes d'apprentissage du réseau). Dans le cadre de cette recherche, les probabilités marginales sont obtenues à partir des diverses données issues de la revue de littérature sur la mobilité résidentielle notamment les enquêtes logement et les données de recensement de la population. Dans notre cas, les simulations que nous réaliserons au prochain chapitre sont basées sur des données d'enquête. La définition des probabilités conditionnelles conduit ainsi à la réalisation des tables de probabilités jointes. Ces données constituent bien évidemment des informations de base (il s'agit de la connaissance *a priori*) qui seront dynamiquement mise à jour (pour produire la connaissance *a posteriori*) durant chaque simulation grâce aux données complémentaires qui seront fournies en entrées dans le simulateur. D'autres informations relatives à la dimension spatiale sont également requises. Elles font l'objet de la section suivante.

6.3. Formalisation de la dynamique spatiale de l'habitat

Nous modélisons la dynamique spatiale de l'habitat par un automate cellulaire à maille régulière carrée (c'est-à-dire basée sur un carroyage) dont le côté de chaque cellule sera fonction de la résolution spatiale de la zone d'étude. Les règles de transition temporelle sont spécifiées par des chaînes de Markov contraintes.

6.3.1. Spécifications partielles de l'automate cellulaire

Le développement d'un outil de simulation de type multi-agents ou automate cellulaire demande préalablement une démarche conceptuelle, de formalisation indépendante de l'informatique, qui doit si possible s'appuyer sur un corpus théorique [Langlois, 2006]. Nous avons répondu à cette exigence scientifique au travers du cinquième chapitre relatif à la modélisation des automates cellulaires. L'objectif de cette section est donc de procéder à la formalisation du modèle d'automate cellulaire applicable à la thématique de la mobilité résidentielle. Nous définissons donc les spécifications formelles relatives aux notions de champ cellulaire, d'état, de voisinage et configuration initiale.

- *Le champ ou le réseau cellulaire* : c'est l'ensemble des cellules disposées dans l'espace selon un arrangement topologique bien défini, qui correspond en l'occurrence à une grille de carroyage dont la résolution spatiale (que nous noterons *ResolutionSpatiale*) sera définie par l'utilisateur du simulateur. La résolution spatiale est la structure de données qui encapsule les dimensions de chaque cellule. Chaque cellule ayant une forme géométrique carrée, la résolution spatiale définit donc le côté d'une cellule. Le réseau cellulaire peut être carré ou rectangulaire, composé de cellules carrées. Il correspond à la cartographie de la zone d'étude. Le nombre total de cellules (que nous notons *NbreTotalCellules*) composant le champ cellulaire est donc obtenu par la relation suivante :

$$NbreTotalCellules = \frac{LargeurChampCellulaire * HauteurChampCellulaire}{ResolutionSpatiale^2} \quad (6.4)$$

où *LargeurChampCellulaire* et *HauteurChampCellulaire* désignent les dimensions physiques de la zone d'étude. En effet, *NbreTotalCellules* n'est rien d'autre que le produit du nombre de lignes ($NbreLignes = \frac{HauteurChampCellulaire}{ResolutionSpatiale}$) par le nombre de colonnes ($NbreColonnes = \frac{LargeurChampCellulaire}{ResolutionSpatiale}$) de la grille du carroyage appliqué à la zone d'étude. Chaque cellule pourra ainsi être identifiée (C_{ij} avec $0 \leq i \leq NbreLignes - 1$ et $0 \leq j \leq NbreColonnes - 1$) par sa position topologique dans la grille à partir de la ligne et de la colonne dont le croisement définit son coin supérieur gauche comme l'illustre la figure 6.4.

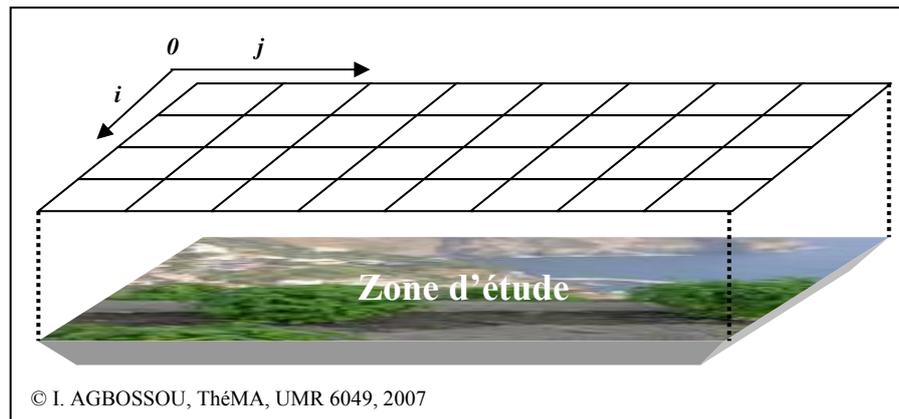


Figure 6.4 : Application du carroyage à la zone d'étude

- *Les états* : chaque état correspond à une occupation du sol. Il s'agit de : appartement loué, appartement acheté, maison louée, maison achetée, eau, commerce, équipement, réseau routier ou ferré, espace vert ou forêt, zone constructible (que nous notons respectivement *AptLoue*, *AptAchete*, *MLouee*, *MAcheee*, *Eau*, *Cce*, *Eq*, *Reseau*, *EspaceVert*, *ZoneConst*). Nous distinguerons trois catégories d'états : les états dynamiques, les états statiques et les états pseudo-dynamiques. Les états dynamiques matérialisent les occupations du sol susceptibles de changer de nature des le temps c'est-à-dire pendant la simulation (*AptLoue*, *AptAchete*, *MLouee* et *MAcheee*). Les états statiques (*Eau*, *Cce*, *Eq*, *Reseau* et *EspaceVert*) ne subissent pas de transition au fil du temps mais exerce une certaine influence sur le comportement des ménages en ce qui concerne leurs choix résidentiels. L'état pseudo-dynamique (*ZoneConst*) se comporte comme un état statique tant qu'il n'y a pas de nouvelle dans la cellule qu'il occupe ; mais se comporte comme un état dynamique dans le cas contraire. L'ensemble des états du système est donc l'ensemble E défini par $E = \{AptLoue, AptAchete, MLouee, MAcheee, Eau, Cce, Eq, Reseau, EspaceVert, ZoneConst\}$
- *Le voisinage* : comme justifié au chapitre 5, c'est au travers du voisinage de Moore (chaque cellule possède théoriquement huit voisins) que nous matérialisons par la concrétisation de l'interaction spatiale entre les cellules. En réalité, toutes les cellules n'auront pas exactement huit voisins en raison de leur position topologique dans le champ cellulaire. C'est le cas par exemple des cellules C_{00} , C_{0j} , C_{i0} et $C_{NbreLignes-1, NbreColonnes-1}$. L'interaction spatiale des cellules est donc modélisée, pour chaque cellule, par un potentiel d'attraction ($P_{C_{ij}}$)

mesuré par le rapport entre le nombre de cellules de son voisinage ayant le même état qu'elle-même, pondéré par un facteur d'accélération ou de freinage et le nombre de cellules présentes dans le voisinage.

$$P_{C_{ij}} = \frac{\sum \text{VoisinsDeMemeEtat}(C_{ij})}{\text{NbreVoisins}} * \alpha_{ij} \quad (6.5)$$

La fonction $\sum \text{VoisinsDeMemeEtat}(C_{ij})$ retourne par calcul le nombre de cellules ayant le même état que la cellule C_{ij} dans son voisinage. Le facteur d'accélération ou de freinage α_{ij} est obtenu par l'application d'une fonction sigmoïde :

$$\frac{1}{1 + e^{-\lambda t}}$$

où t désigne le temps et le paramètre λ la qualité de l'environnement résidentiel. En effet, les propriétés de la fonction sigmoïde s'expliquent par celle de sa dérivée

$$\frac{d\alpha_{ij}}{dt} = \frac{\lambda * e^{-\lambda t}}{(1 + e^{-\lambda t})^2}$$

qui peut se transformer en

$$\frac{d\alpha_{ij}}{dt} = \lambda * (\alpha_{ij}) * (1 - \alpha_{ij}).$$

Cette équation différentielle exprime le fait que la variation de α_{ij} dans l'intervalle $]0, 1[$ au cours du temps est à la fois proportionnelle à elle-même (α_{ij}) et à son complément ($1 - \alpha_{ij}$), proportionnalité affectée par la qualité environnementale. La figure 6.5 (où $f(x) \equiv \alpha_{ij}$ et $x \equiv -\lambda t$) donne la forme de la fonction sigmoïde.

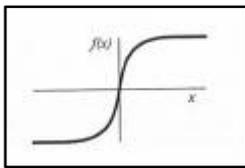


Figure 6.5 : Allure d'une fonction Sigmoïde

- *La configuration initiale* : le point de départ de toute simulation est une configuration initiale définissant l'occupation du sol de chaque cellule. Dans notre cas, elle peut être fournie par l'utilisateur du simulateur grâce à un éditeur d'état embarqué dans le simulateur ou encore être définie de façon aléatoire à

partir de la cartographie de la zone d'étude. Le comportement résidentiel des agents (ménages) modifie à la première itération cette configuration pour en faire une autre. Et c'est le croisement de ces deux configurations diachroniques (la configuration initiale et celle générée par le comportement des ménages à la première itération) qui permet d'établir la table de contingence, laquelle permet de construire la matrice de transition. Cette construction diachronique de la matrice de transition se fait donc de façon dynamique durant toute la durée de la simulation entre les dates $t-2$ et $t-1$ pour à l'occupation du sol à la date t .

6.3.2. Construction de la matrice de transition

Une table de contingence permet de représenter de façon statique l'information dans un tableau à double entrée. La prise en compte de la dimension dynamique passe par la transformation de cette table en matrice de transition puis en chaîne de Markov.

Pour acquérir les informations nécessaires à l'élaboration de la table de contingence, nous proposons un algorithme (AGTCS : *Algorithme de Génération de Table de Contingence Spatiale*) qui prend comme données d'entrée la configuration initiale. La zone d'étude est partitionnée en autant de classes qu'il y a d'états, en l'occurrence nous aurons dix classes (c'est-à-dire dix partitions spatiales de la zone d'études). Chaque classe est alors étiquetée par un état. On comptabilise ensuite le nombre d'occurrences (chaque cellule matérialisant un état donné) présentes pour chaque état dans chacune des classes. La table de contingence ainsi obtenue possède autant de lignes et de colonnes qu'il y a d'états dans le système. Dans notre cas cette table possède dix lignes et dix colonnes comme schématisé à la figure 6.6.

	Classes de partition			
États	I	II	X
e_1	n_{1I}	n_{1II}	n_{1X}
e_2	n_{2I}	n_{2II}	n_{2X}
...
e_{10}	n_{10I}	n_{10II}	n_{10X}

Figure 6.6 : Structure de la table de contingence

Les informations contenues dans la partie grisée de la table représentent le nombre de cellules se trouvant dans un état donné dans une partition précise. Ainsi la somme de tous les éléments de chaque ligne ($n_i = \sum_{j=1}^X n_{ij}$) correspond au nombre total de cellules occupant l'état e_i dans la configuration initiale. La somme des n_i donne le nombre total de cellules définissant le système. L'objectif étant d'obtenir une matrice carrée contenant les valeurs constituant chaque vecteur d'état, nous appliquons le principe de la fonction *Max* sur chaque colonne afin de l'identifier par l'étiquette de l'état dominant. La figure 6.7 déroule l'algorithme en pseudo code permettant de calculer la table de contingence à partir de la configuration initiale.

```

fonction AGTCS(ConfigurationInitiale) retourne la table de contingence
  Données d'entrée :
    ConfigurationInitiale ; // définie à partir de la zone d'étude par l'utilisateur
  Variables locales :
    NbreEtats ← card(E) ; // E étant l'ensemble des états du système
    NbreDeCellulesParPartition ← NbreTotalCellules/NbreEtats ;
    Partition ← Liste<Cellule> ; // création d'une structure de données de
    // liste de cellules pour chaque partition
    Parties ← Liste<Partition> ; // création d'une liste de NbreEtats éléments
    // pour contenir les partitions
    Etats ← Liste<Etat> ; // création d'une liste de NbreEtats éléments
    // pour stocker l'ensemble des états
    Table ← double[NbreEtats][NbreEtats] ; // création d'un tableau à
    // double entrée pour stocker
    // les informations

  Calcul des effectifs  $n_{ij}$  :
    Pour chaque Partition  $p_j$  de Parties
      Pour chaque Etat  $e_i$  de Etats
        Partition ←  $p_j$  ;
        occurrence ← 0 ;
        Pour chaque cellule  $c$  de  $p_j$ 
          Si  $e_i ==$  état de  $c$ 
            occurrence++ ;
          FinSi
        FinPour
        Table[i][j] ← occurrence ;
      FinPour
    FinPour
  Retourne Table ; // retourne la table de contingence remplie

```

© I. AGBOSSOU ThéMA, UMR 6049, 2007

Figure 6.7 : Algorithme de Génération de Table de Contingence Spatiale

Dans cet algorithme, nous devons signaler que le partitionnement de la zone d'étude en classes (étiquetées chacune par un état) est basé sur la méthode des stratifications

notamment le sondage en grappes à probabilités égales. En effet, la stratification consiste en des tirages séparés effectués dans des sous-populations supposées, en l'occurrence, plus homogènes que la population mère (la zone d'étude elle-même). Etant donné que nous travaillons sur un espace géographique, l'ensemble des strates constitue des grappes [Saporta, 2006 ; Robert, 1996 ; Droesbeke *et al.*, 2002] de dix sous-populations.

Une fois la table de contingence obtenue il devient plus aisé de calculer la matrice de transition par transformation des effectifs n_{ij} en une valeur probabiliste $f_{ij} = n_{ij}/n_i$.

```

fonction MatriceDeTransition(tableDeContingence) retourne la matrice de transition
Données d'entrée :
    tableDeContingence ; // fournie par la méthode AGTCS
Variables locales :
    NbreEtats ← card(E) ; // E étant l'ensemble des états du système
    ConfigurationInitiale ; // définie à partir de la zone d'étude
    ni ; // nombre de cellules de chaque état (i = 1, ..., 10) présent dans
        // dans la configuration initiale du système cellulaire
    Table ← double[NbreEtats][NbreEtats] ; // création d'un tableau à double
        // entrée pour stocker les valeur fij

Calcul des valeurs probabilistes fij :
    Pour j = 1 à 10
        Pour i = 1 à 10
            fij ← TableDeTransitio[i][j] / ni ;
            Table[i][j] ← fij ;
        FinPour
    FinPour
Retourne Table ; // retourne la de matrice de transition remplie

```

La matrice de transition se présente sous la forme suivante :

$$Q = \begin{bmatrix} f_{11} & \cdots & f_{1,10} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ f_{10,1} & \cdots & f_{10,10} \end{bmatrix}$$

© I. AGBOSSOU Théma, UMR 6049, 2007

Figure 6.8 : Calcul de la matrice de transition

L'estimation d'une matrice de transition à partir d'un ensemble de données amène à se poser au moins une question à savoir "La matrice a-t-elle été correctement estimée ?". Si le calcul des valeurs probabilistes de la matrice ne pose pas de problème particulier, rien ne permet *a priori* d'affirmer que l'estimation obtenue est de bonne qualité. Concrètement, il est nécessaire de se demander si les données utilisées permettent une estimation robuste de la matrice. En effet, une matrice de transition est un objet synthétisant l'information sur les relations entre plusieurs variables. Pour quantifier

cette information, il est nécessaire de définir un principe de mesure. En l'occurrence, nous prendrons pour point de départ l'idée qu'une matrice est d'autant plus informative, dans le cadre de l'application des chaînes de Markov, que la connaissance de la modalité ligne permet de réduire l'incertitude existant sur la modalité colonne [Meyn et Tweedie, 1993 ; Berchtold, 1998, *op. cit.* ; Dupuis, 2002]. Aussi l'une des approches les plus pertinentes dans ce cas est l'utilisation d'une matrice de transition d'ordre 1 calculée à partir de la représentation autorégressive [Raftery et Tavaré, 1994] des données (la configuration initiale dans notre cas) ; voilà qui justifie la pertinence de l'algorithme de génération de la table de contingence spatiale.

La dynamique visuelle du système est régie par les règles de transition des cellules (passage d'un état à un autre). Mais elle est également soumise aux variations comportementales de l'ensemble des ménages qui en retour modifient les configurations spatio-fonctionnelles de l'habitat par le biais de jeux d'interactions spatio-temporelles. La modélisation du couplage des SMA et des automates cellulaires nous permet de préciser d'avantage le déroulement de l'ensemble de ces processus.

6.4. Modèle algorithmique du système résidentiel : couplage SMA-AC

Si l'on avait une connaissance parfaite de l'environnement dans lequel nous vivons, l'approche logique devrait permettre de faire des choix ou de confectionner des plans dont le bon fonctionnement serait garanti. Malheureusement, les agents n'ont pratiquement jamais accès à toute la connaissance sur leur environnement, et doivent donc agir dans l'incertitude.

6.4.1. Comment modéliser le comportement humain ?

Si l'on s'intéresse au comportement humain, il est nécessaire de se pencher sur un certain nombre de sujets tels que la compréhension des mécanismes sous-tendant, entre autres, le fonctionnement de la mémoire et de la perception. En somme, arriver à comprendre et décrypter le fonctionnement des facultés cognitives. D'après H. Mallot [Mallot, 1997], le mot cognition se réfère généralement à des processus mentaux variés tels que l'attention, la reconnaissance des lieux et des objets, la planification et le raisonnement. La théorie du contrôle en psychologie comportementale, telle que la

décrivent R. Lord et P. Levy [Lord et Levy, 1994] reprend le principe des boucles de rétroaction tout en l'étendant à l'ensemble des processus comportementaux de la tâche d'asservissement à la régulation des comportements sociaux. Pour ces chercheurs, la généralité des boucles de rétroaction pour la description du comportement provient de la nature hiérarchique des systèmes de contrôle, même si la nature des activités de contrôle peut être très différente selon les niveaux. Parmi les diverses classifications de ces niveaux, nous nous référons à celle introduite par A. Newell dans *Unified Theories of Cognition* [Newell, 1990]. Cette classification est décrite en quatre niveaux : le premier représente des comportements réflexes de type attraction-répulsion, le second représente des comportements nécessitant une intégration spatio-temporelle, le troisième traite de la plasticité du second et le dernier, appelé cognitif et qui nous intéresse en l'occurrence, ne dépend plus seulement de stimuli sensoriels, mais aussi des buts poursuivis par la personne.

La problématique de la modélisation du comportement humain dans le cadre d'applications de simulation n'est pas de reproduire fidèlement l'intelligence humaine mais de proposer une architecture permettant de modéliser des comportements crédibles et réalistes d'agents anthropomorphes évoluant en temps réel, chacun, dans son environnement.

6.4.2. Revisite de l'architecture d'agent cognitif de type BDI

Les systèmes réactifs ne sont pas suffisants pour décrire l'ensemble des comportements, notamment rationnels et sociaux. Il est ainsi nécessaire de recourir aux modèles cognitifs qui représentent des connaissances (croyances, intentions, plans objectifs, etc.) d'un agent. La figure 4.2 du quatrième chapitre, sert de support pour représenter l'architecture d'agents cognitifs. Les architectures cognitives visent à unifier au sein d'un même modèle un ensemble de propriétés communément admises au sein de la communauté scientifique (psychologie, neurosciences, ergonomie, intelligence artificielle et intelligence artificielle distribuée, animation et réalité virtuelle, etc.) sur la cognition humaine [Lamarche, 2003 ; Donikian, 2004 ; Burkhardt et al., 2004]. Aussi, le comportement d'un agent dépend de son espace d'évolution et de ces connaissances. En adéquation avec la théorie de Gibson [Gibson, 1986] et plus précisément celle de Rillieux et Quéré [Rillieux et Quéré, 1998] sur les affordances spatiales, G. Thomas [Thomas, 2005] a montré que l'on peut informer l'environnement urbain en

caractérisant les espaces d'évolution, en prenant en compte leur configuration, les objets qu'ils contiennent et leur structuration méréotopologique (c'est-à-dire la combinaison de la topologie à la méréologie permettant ainsi d'ajouter à la relation de l'ensemble du voisinage d'une cellule donnée à la zone d'étude entière). L'environnement contient donc les informations nécessaires aux prises de décision des agents. Ceci est illustré par l'algorithme générique de prise de décision atomique (une action) d'un agent dans la figure 6.9. Conformément à l'architecture BDI, les intentions permettent à un agent de raisonner sur son état interne et celui des autres avec lesquels il est en interaction à partir des informations qu'il obtient par le biais de son environnement. Avec ce modèle, il est possible de spécifier les buts à atteindre et de trouver une stratégie les satisfaisant. La simulation par agents autonomes dotés de comportements sophistiqués passe donc par la prise en compte de l'environnement. En complément de la représentation géographique et géométrique (modélisée par l'automate cellulaire) de l'environnement, il est nécessaire de fournir pour chaque agent un modèle symbolique des autres agents avec lesquels il entretient une relation sociale.

```

fonction DecisionAtomique(environnement) retourne une action
  Données d'entrée :
    environnement ; //environnement dans lequel se trouve l'agent
  Variables locales :
    Agents ; // les autres agents avec lesquels il est
              // en interaction
    Desirs ; // les désirs possibles de l'agent
    But ; // un but, initialement vide
    Action ; // action à accomplir, initialement vide

    Agents ← GetAlterEgo(environnement) ;
    Desirs ← ActualiserMesDesirs(environnement, Agents) ;
    But ← FormulerMonBut(Desirs) ;
    Action ← IdentifierLesActions(But) ;
  Retourne Action ;

```

© I. AGBOSSOU ThéMA, UMR 6049, 2007

Figure 6.9 : Algorithme de prise de décision atomique d'un agent BDI résidentiel

Chaque agent, à chaque itération, commence par actualiser ses désirs ; ce qui lui permet de formuler ou de reformuler un nouvel objectif à atteindre. Pour ce faire, il identifie la ou les actions à entreprendre. Pour un ménage, une action peut prendre l'une des valeurs suivantes : chercher un appartement à louer, chercher un appartement à acheter, chercher une maison à louer ou chercher une maison à acheter.

Mais le fait d'identifier des actions à accomplir n'induit pas automatiquement une prise de décision de la part d'un agent résidentiel quand à son changement de logement. En effet, d'autres contraintes et conditions sont requises pour parvenir à une prise de décision en ce qui concerne le choix et la migration.

6.4.3. Le choix d'un nouveau lieu de résidence et la décision de migrer

Dès lors que le ménage a identifié l'action à accomplir, le processus de mobilité peut commencer. Trois éléments particulièrement intéressants entrent en jeu : la propension du ménage à être mobile, le choix du nouveau lieu de résidence et la migration effective. Détaillons pas à pas la formalisation de chacun de ces trois éléments.

- **La propension à migrer** : elle est une fonction globale de l'ensemble des variables caractéristique d'un ménage. Ainsi, à partir de la base de connaissance (cf. Figure 6.3) d'un agent, il est possible de calculer sa propension à migrer en déroulant l'inférence bayésienne suivante : $P_k^t = P(\text{migration}|K)$ où k désigne un type de ménage donné et K le vecteur de modalités décrivant le ménage à la date t .
- **Le choix du nouveau lieu de résidence** : en ce qui concerne le choix de la localisation résidentielle, le comportement migratoire des ménages est fortement influencé par les caractéristiques (la qualité environnementale) et les propriétés intrinsèques des logements actuel et futur. Ainsi, pour orienter son choix, le ménage a besoin d'espace de référence muni d'une certaine métrique ; c'est-à-dire les limites spatiales de son champ d'investigation. Il s'agit en l'occurrence des limites spatiales définies par le concept de voisinage que nous avons appliqué aux cellules. En effet, l'agent procède à une exploration systématique de la zone d'étude selon un partitionnement basé sur le voisinage. En fonction de l'offre de logements disponibles, il sélectionne les logements susceptibles de l'accueillir en ne retenant que ceux dont le potentiel d'attraction ($P_{C_{ij}}$) est supérieur à son confort résidentiel actuel ($P_k^t * \lambda$). Notons que par souci de simplification et de réalisme, le paramètre λ qui exprime la qualité de l'environnement résidentiel (cf. §5.3.1) est précisé en entrée au modèle de simulation par l'utilisateur pour chaque catégorie de logement. Enfin, une comparaison deux à deux de ces logements lui permet de choisir celui qui a le

meilleur score. C'est ce logement qui est finalement susceptible de l'accueillir, s'il migre effectivement.

- **La migration effective** : il n'est pas rare que l'on revienne sur une décision ou un choix pour une quelconque raison. Aussi dans le cadre du modèle de simulation que nous élaborons, étant donné que la résidence seconde n'est pas prise en compte, un changement de logement n'est effectif que si le nouveau logement choisi est occupé par le ménage et que l'ancien est libéré.

Pour une vision synthétique de l'ensemble des processus régissant à la fois le comportement résidentiel des ménages et leurs influences réciproques sur l'habitat dont la dynamique est modélisée selon une approche par automates cellulaire. Nous présentons le modèle mathématique de l'évolution du système résidentiel.

6.4.4. Formalisation mathématique de la dynamique globale du système

Avant de pouvoir présenter le modèle global du système, nous donnons quelques précisions sur sa dynamique démographique. Pour que l'évolution de la structure des ménages simulée dans le système prolonge de manière cohérente celle observée par l'Insee depuis une vingtaine d'années, il convient de modéliser de façon relativement précise l'histoire familiale des ménages. Il s'agit en l'occurrence de la formation d'un nouveau ménage, l'éclatement d'un ménage existant et la disparition d'un ménage. Pour ce faire nous nous basons sur la typologie des ménages à quatre niveaux (personne seule, couple sans enfant, couple avec enfant et famille monoparentale) que nous avons présentée au deuxième chapitre (*cf.* figure 2.6).

La modélisation des événements est souvent délicate car les données disponibles restent parcellaires et permettent difficilement de rendre compte des effets de génération. Pour cela et en raison d'autres facteurs d'instabilité à long terme des modèles, les durées de simulation n'excéderont pas la décennie. Les choix méthodologiques retenus pour la modélisation de la dynamique démographique du système ont été de partir des résultats de microsimulation dynamique du modèle DESTINIE [INSEE, 1999 *op. cit.* ; Robert-Bobée, 2002a *op. cit.* ; Bonnet et *al.*, 1999] élaboré par des services de L'Insee et aussi des tables de mortalité françaises pour les XIX^{ème} et XX^{ème} siècles et projections pour le XXI^{ème} siècle [Vallin et Meslé, 2002]. Les comportements matrimoniaux et la fécondité intégrés dans DESTINIE sont estimés à partir de l'enquête Jeunes et Carrières, enquête complémentaire à l'enquête Emploi réalisée en mars 1997 par l'Insee. Ceci a conduit à

la reproduction, de probabilités, entre autres, de mise en couple, de ruptures des unions [Robert-Bobée, 2001 ; 2002b].

6.4.4.1. La formation de nouveaux ménages : union ou éclatement d'un ménage existant

Les statistiques d'état civil offrent un point de départ à la modélisation. Elles fournissent des taux de nuptialité qui sont ensuite "adaptés" pour tenir compte du comportement des ménages. On dispose notamment des taux conjoncturels de primo-nuptialité en fonction de l'âge et du sexe [Kerjosse et Tamby, 1996 ; Toulemon, 1996]. Selon ces sources, la première mise en couple se situerait entre 16 et 49 ans pour les femmes avec une valeur modale de 26 ans, entre 18 et 50 ans pour les hommes avec un pic à 28 ans. Ces statistiques d'état civil ne peuvent toutefois rendre compte à elles seules des comportements matrimoniaux des ménages. En effet, la vie maritale s'est largement diffusée comme mode d'entrée en union depuis quatre décennies ans, passant de 10 % à 90 % des couples entre 1965 et 1995 [Villeneuve-Gokalp, 1994]. Si la cohabitation hors mariage est la forme de vie en couple principale en début d'union, particulièrement chez les jeunes, elle devient aussi un mode de vie durable [Lefranc, 1995 ; Daguet, 1996]. Aussi, dans le cadre de ce travail, nous traitons indifféremment les mises en couple suite au mariage, les cohabitations hors mariage ainsi que les couples homosexuels car chaque ménage d'un type donné est représenté par une personne de référence. La modélisation retenue à ce stade consiste à prendre, à chaque pas de temps, un taux $T_{\text{UnionDesPersonnesSeules}}$ (dont la valeur par défaut est de 90%, mais paramétrable en début de simulation) des ménages de type "Personne seule", les mettre en union deux à deux pour former de nouveaux ménages de type "Couple sans enfant". Le départ du domicile parental peut être ou non consécutif à une mise en couple. En effet, nous faisons l'hypothèse qu'il y a éclatement d'un ménage existant seulement lorsqu'un enfant en début de vie active quitte ses parents. Les ménages dont la personne de référence ou le conjoint éventuel est étudiant ou en début de vie active représentent moins de 2 % de l'ensemble des ménages ordinaires (Insee, enquête « Budgets de Famille » 1995). Ainsi nous appliquons un taux $T_{\text{Décohabitation}}$ (dont la valeur par défaut est de 2%, mais paramétrable en début de simulation) sur l'ensemble des ménages de types "Famille monoparentale" et "Couple avec enfants" pour obtenir de nouveaux ménages de type "Personnes seules" à chaque pas de temps durant la simulation. Ce

choix de modélisation présente l'avantage que les jeunes ménages présentent des revenus nuls (car on ne modélise pas la solidarité financière entre ménages).

Outre le départ des enfants du domicile parentale, il y aussi les dissolutions des couples. Les statistiques d'état civil fournissent des taux de divorce ou de séparation en fonction de la durée du mariage ou de la cohabitation. Selon ces sources, l'intensité finale des séparations est égale à 35%, répartie entre 1 et 40 ans d'union, avec un mode estimé à 3 ans [Sardon, 1996 ; Daguet, 1996, *op. cit.*]. Compte tenu du faible taux de divorce observé au delà de 40 années de mariage, nous supposons qu'un couple ne se sépare plus au delà de quarante ans de vie commune. Mais dans le cadre de ce travail, étant donné que la durée maximale de simulation est limitée à dix ans avec un pas de temps calé sur un semestre, aucun ménage n'aura accumulé quarante de vie commune à la fin de toute simulation. Et nous appliquons un taux de dissolution $T_{Dissolution}$ (dont la valeur par défaut est de 35%, mais paramétrable en début de simulation) aux ménages de types "Couple sans enfant" et "Couple avec enfants". Ainsi, si un couple sans enfant se dissout, alors l'effectif des ménages de type "Personne seule" est incrémenté de deux point et celui des "Couple sans enfant" est décrémenté de l'unité. En revanche, s'il s'agit d'un couple avec enfant, alors la catégorie "Personne seule" est incrémentée d'un point, la catégorie "Famille monoparentale" d'un point aussi et "Couple avec enfant" est décrémenté de l'unité. Les équations algorithmiques de la figure 6.6 résument l'ensemble de ces dynamiques.

```

EffeciftPersonnesSeules -= TUnionDesPersonnesSeules * EffeciftPersonnesSeules ;
EffeciftPersonnesSeules += (EffeciftCoupleAvecEnfants + EffeciftFamilleMonoparentale) * TDécohabitation ;
EffeciftCoupleSansEnfant +=  $\frac{1}{2}$  TUnionDesPersonnesSeules * EffeciftPersonnesSeules ;

// Dissolution des couples sans enfant
EffeciftCoupleSansEnfant -= TDissolution * EffeciftCoupleSansEnfant ;
EffeciftPersonnesSeules += 2 * TDissolution * EffeciftCoupleSansEnfant ;

// Dissolution des couples avec enfants
EffeciftCoupleAvecEnfant -= TDissolution * EffeciftCoupleAvecEnfant ;
EffeciftPersonnesSeules += TDissolution * EffeciftCoupleAvecEnfant ;
EffeciftFamilleMonoParentale += TDissolution * EffeciftCoupleAvecEnfant ;

```

© I. AGBOSSOU ThéMA, UMR 6049, 2007

Figure 6.10 : Equations algorithmiques de la formation de nouveaux ménages

6.4.4.2. La disparition d'un ménage

La disparition d'un ménage s'exprime par le fait qu'il n'a plus d'instance dans le système. Cela veut dire que la personne de référence est décédée. Cette modélisation peut s'effectuer de deux façons. D'une part, on peut simplement considérer l'espérance de vie des personnes de référence des ménages. D'autre part, on peut estimer le quotient de mortalité *ex-ante* des individus et l'appliqué à la personne de référence. Dans ce cas, ce quotient de mortalité peut faire office d'un indicateur de morbidité explicatif des probabilités de décès. Cependant, pour faire simple, nous choisissons dans le cadre de notre travail, la première option. Ainsi le décès de la personne de référence n'aura d'effet que sur les ménages de type "Personne seule". Et le logement occupé par ce dernier est donc automatiquement libéré. Les autres types de ménages ne subiront aucune influence de la disparition de leur personne de référence dans le sens où nous faisons l'hypothèse qu'il y aura soit substitution de cette dernière en cas de décès soit absence de désir de déménager. Dans ce cas, seule l'équation algorithmique suivante est requise pour la simulation :

$$\begin{cases} \text{Pour chaque ménage de type "Personne seule"} \\ \text{Si } Age == EsperanceDeVie, \text{ alors} \\ Effectif_{PersonneSeule}^t \leftarrow Effectif_{PersonneSeule}^t - 1; \end{cases} \quad (6.6)$$

Comme pour les divers taux démographiques, l'espérance de vie des ménages est aussi paramétrable en début de simulation.

6.4.4.3. Mathématisation de la dynamique du système résidentiel

Eu égard à tout ce qui précède, nous représentons dans ce paragraphe le formalisme mathématique régissant l'ensemble du système résidentiel. En notant M_k un ménage de type $k \in \{\text{"Personne seule"}, \text{"Couple sans enfant"}, \text{"Couple avec enfant"}, \text{"Famille monoparentale"}\}$ et $C_{ij}(e)$ une cellule donnée dans un état $e \in \{\text{AptLoue}, \text{AptAchete}, \text{MLouee}, \text{MAchetee}, \text{Eau}, \text{Cce}, \text{Eqt}, \text{Reseau}, \text{EspaceVert}, \text{ZoneConst}\}$, on peut formaliser l'état du système résidentiel à une date t de la façon suivante :

$$\begin{cases} M_k^t(l) = f \left(M_k^{t-\delta t}(l), P_k^{t-\delta t}, \bigcup_{i=0; j=0}^{n; m} C_{ij}^{t-\delta t}(e) \right) \\ C_{ij}^t(e) = g \left(C_{ij}^{t-\delta t}(e), P_{C_{ij}}^{t-\delta t}, M_k^t(l) \right) \end{cases} \quad (6.7)$$

δt désigne le pas de temps (par défaut chaque itération correspondra à une durée de six mois dans la réalité) ;

$\bigcup_{i=0; j=0}^{n; m} C_{ij}^{t-\delta t}(e)$ modélise l'offre de logements disponibles et c'est parmi ces derniers que le ménage de type k pourra choisir un logement l à la date t si sa migration est effective : $M_k^t(l)$. Dans ce cas son ancien logement devra se libérer et s'ajouter à l'offre disponible ;

$C_{ij}^t(e)$ formalise la transition d'une cellule donnée d'un état à un autre, et ce en fonction de l'état dans lequel elle se trouve à l'itération précédente, de son potentiel d'attraction et du choix résidentiel des ménages.

En effet, les équations (6.7) traduisent la double interaction entre les deux grandes entités du système résidentiel (*cf.* Figure 2.2) à savoir l'habitat et les habitants. A chaque pas de temps δt , il se produit une série d'interactions (changement de statut d'occupation, achat, location de logement, vieillissement, etc.) au niveau des ménages (SMA). Ces interactions ont une répercussion spatiale qui se matérialise au niveau de l'automate cellulaire. Celui-ci, en retour, rétroagit sur les comportements des ménages. Le processus évolue donc de cette façon durant toute la durée de simulation. La transformation de l'équation (6.7) conduit à l'obtention de l'ensemble des règles probabilistes de transition qui devraient gouverner la dynamique résidentielle du système.

En posant l'hypothèse markovienne selon laquelle "*la probabilité de transition d'une cellule d'un état à un autre ne dépend que de son état actuel et non de son histoire*"

$$\begin{cases} P_k^{t+1}(C_{ij}^{t+1} = e) = P_k(C_{ij}^{t+1} = e | C_{ij}^t = e') * P(C_{ij}^t = e') \\ P(C_{ij}^{t+1} = e) = \sum_{ij}^{voisinage} P(C_{ij}^t = e | C_{ij}^{t-1} = e' \in E \setminus \{e\}) \end{cases} \quad (6.8)$$

La première ligne de l'équation (6.8) se traduit comme suit : la probabilité pour qu'un ménage de type k choisisse un logement dont l'état est e au temps $t+1$. La seconde ligne formalise la probabilité qu'une cellule occupe l'état e au temps $t+1$ d'après son voisinage où s'exprime son potentiel d'attraction. La figure 6.12 et la figure 6.11 présentent respectivement le code source de chacune de ces lignes d'équation. Dans la

figure 6.12 on remarquera l’usage d’un générateur pseudo-aléatoire (la fonction *Random*) sur les cellules. En effet, lorsque plusieurs cellules remplissent les conditions de choix pour un ménage donné, ce dernier choisit une au hasard.

```
// Règles de transition intrinsèques des cellules selon le voisinage et le potentiel
foreach(Cellule cel in CellulesSimulables)
{
    // récupérer le potentiel d'attraction de la cellule au temps t+dt
    double potentiel = cel.PotentialOfAttraction(CompteurDuTemps);
    //Transition d'une cellule constructible
    if(cel.IsConstructible)
        switch(cel.GetEtatDominantDuVoisinage())
        {
            case EtatPossible.AppartementAchete:
                cel.ChangeToAppartementAchete(CleValeurEtatCouleur);
                break;
            case EtatPossible.AppartementLoue:
                cel.ChangeToAppartementLoue(CleValeurEtatCouleur);
                break;
            case EtatPossible.MaisonAchete:
                cel.ChangeToMaisonAchete(CleValeurEtatCouleur);
                break;
            case EtatPossible.MaisonLoue:
                cel.ChangeToMaisonLoue(CleValeurEtatCouleur);
                break;
        }
    else if(cel.Etat == EtatPossible.MaisonLouee && potentiel > 1.0)
    {
        // Si l'état dominant du voisinage est une maison achetée alors, changer en maison achetée
        if(cel.GetEtatDominantDuVoisinage() == EtatPossible.MaisonAchete)
            cel.ChangeToMaisonAchete(CleValeurEtatCouleur);
    }
    else if(cel.Etat == EtatPossible.MaisonAchete && potentiel > 1.0)
    {
        // Si l'état dominant du voisinage est une maison louée alors, changer en maison louée
        if(cel.GetEtatDominantDuVoisinage() == EtatPossible.MaisonLoue)
            cel.ChangeToMaisonLoue(CleValeurEtatCouleur);
    }
    else if(cel.Etat == EtatPossible.AppartementLoue && potentiel > 1.0)
    {
        // si l'état dominant du voisinage est appartement acheté alors, change en appartement acheté
        if(cel.GetEtatDominantDuVoisinage() == EtatPossible.AppartementAchete)
            cel.ChangeToAppartementAchete(CleValeurEtatCouleur);
    }
    else if(cel.Etat == EtatPossible.AppartementAchete && potentiel > 1.0)
    {
        // Si l'état dominant du voisinage est appartement loué alors, change en appartement loué
        if(cel.GetEtatDominantDuVoisinage() == EtatPossible.AppartementLoue)
            cel.ChangeToAppartementLoue(CleValeurEtatCouleur);
    }
}
}
```

Figure 6.11 : *Algorithme des règles de transition selon le voisinage et le potentiel*

```

// Règles de transition dictées par le comportement des ménages

//Récupération des différents typs de logements (maisons ou appartements)
List<Cellule> maisons = EnsembleDesLogements.FindAll(Cellule.EstUneMaison);
List<Cellule> apparts = EnsembleDesLogements.FindAll(Cellule.EstUnAppartement);

foreach(Menage agent in AgentsResidentiels.EnsembleDesMenages)
{
    switch(agent.DesirDuMenage)
    {
        case Desir.HabiterUnAppartement:
        {
            Cellule cellule = apparts[new Random().Next(0, apparts.Count - 1)];
            if(agent.ActionsPossibles.Contains(Action.AppartementAchete)
                && agent.Statut == StatutOccupation.Proprietaire)
            {
                cellule.ChangeToAppartementAchete(CleValeurEtatCouleur);
                agent.MigrerEffectivementVers(cellule);
            }
            else if(agent.ActionsPossibles.Contains(Action.AppartementLoue)
                && agent.Statut == StatutOccupation.Locataire)
            {
                cellule.ChangeToAppartementLoue(CleValeurEtatCouleur);
                agent.MigrerEffectivementVers(cellule);
            }
        }
        break;
        case Desir.HabiterUneMaison:
        {
            Cellule cell = maisons[new Random().Next(0, maisons.Count - 1)];
            if(agent.ActionsPossibles.Contains(Action.MaisonAchete)
                && agent.Statut == StatutOccupation.Proprietaire)
            {
                cell.ChangeToMaisonAchete(CleValeurEtatCouleur);
                agent.MigrerEffectivementVers(cell);
            }
            else if(agent.ActionsPossibles.Contains(Action.MaisonLouee)
                && agent.Statut == StatutOccupation.Locataire)
            {
                cell.ChangeToMaisonLouee(CleValeurEtatCouleur);
                agent.MigrerEffectivementVers(cell);
            }
        }
        break;
    }
}

```

Figure 6.12 : *Algorithme des règles de transition selon le comportement des ménages*

L'objectif de ce chapitre a été de montrer et d'expliquer les différentes étapes (les plus importantes à notre avis) d'élaboration de notre modèle de simulation (*VisualSimores* dont les fonctionnalités logicielles sont détaillées au chapitre suivant) selon une approche mathématique et informatique. Après avoir précisé les bases fondamentales du raisonnement par calculs de probabilités conditionnelles sur plusieurs variables simultanées, nous avons défini les conditions d'application de ce principe de l'inférence bayésienne dans la démarche de formalisation des comportements des agents cognitifs (les ménages) en ce qui concerne le processus du choix résidentiel. Ceci nous a permis d'aboutir à l'équation dynamique de la probabilité de changer de logement pour chaque catégorie de ménage. Par ailleurs les aspects spatiaux ont été également pris en compte au travers de la spécification d'un automate cellulaire dont les règles de transition sont contraintes par le comportement cognitif des ménages. Finalement nous avons abouti à la formalisation du couplage SMA-AC qui exprime les dynamiques spatiales et temporelles du système résidentiel.

Ce couplage SMA-AC est intégré et programmé sous forme de prototype logiciel pour des fins de tests et de simulations pour générer des scénarios dont les résultats sont présentés au septième et dernier chapitre de notre thèse.

Bibliographie référencée

[**Bonnet et al., 1999**] C. Bonnet, C. Burricaud, C. Colin, A. Flipo, R. Mahieu, P. Ralle, B. Sédillot. Le modèle de microsimulation dynamique : DESTINIE. Département des Etudes Economiques d'Ensemble, Malakoff, 1999

[**Burkhardt et al., 2004**] J. Burkhardt, S. Donikian, Y. Duthen, O. Héguy, D. Lourdeau, T. Morineau, M. Parenthoën, C. Sanza, J. Tisseau. Action spécifique humain virtuel : vers un humain synthétique temps-réel aussi vrai que nature. Rapport technique, CNRS, 2004

[**Cornuéjols et al., 2002**] A. Cornuéjols, L. Miclet, Y. Kodratof. Apprentissage artificiel : Concepts et algorithmes. Editions Eyrolles, Paris, 2002

[**Daguet, 1996**] F. Daguet. Mariage, divorce et union libre, Insee première n°482, 1996.

[**Donikian, 2004**] S. Donikian. Modélisation, contrôle et animation d'agents virtuels évoluant dans des environnements informés et structurés. HDR de l'Université de Rennes1. URL : <http://www.irisa.fr/bibli/publi/habilitations/donikian/hdr.html> (consulté le 13.03.2007)

[**Droesbeke et al., 2002**] J-J, J. Fine, G. Saporta. Méthodes bayésiennes en statistique. Editions TECHNIP, Paris, 2002

[**Dupuis, 2002**] J. Dupuis. Estimation Bayésienne d'un modèle multi-état markovien. In Méthodes bayésiennes en statistique. Editions TECHNIP, Paris, 2002

[**Frankhauser, 1991**] P. Frankhauser. Beschreibung der Evolution urbaner Systeme mit der Mastergleichung. Thèse de doctorat de l'Université de Stuttgart, 1991.

[**Gibson, 1986**] J. Gibson. The ecological approach to visual perception. NJ : Lawrence Erlbaum Associates, Inc, Hillsdale, 1986

[**Kerjosse et Tamby, 1996**] R. Kerjosse, I. Tamby. La situation démographique en 1994, mouvement de la population, Insee Résultats n°505-506, Paris, 1996

[**Lamarche, 2003**] F. Lamarche. Humanoïdes virtuels, réaction et cognition : une architecture pour leur autonomie. Thèse de doctorat de l'Université de Rennes1, 2003

[**Langlois, 2006**] P. Langlois. Approche conceptuelle de l'espace : structurations de l'espace, du temps et des objets dans un contexte de modélisation multi-agents. in Modélisation et simulation multi-agents : application pour les Sciences de l'Homme et de la Société, Editions Hermes-Lavoisier, Paris 2006

[**Lefranc, 1995**] C. Lefranc. Le mariage en déclin, la vie en couple aussi, Insee première n°392, 1995.

[**Lord et Levy, 1994**] R. Lord, P. Levy. Moving from cognition to action : A control theory perspective. In Applied psychology : an international review n°43, 1994

[**Mallot, 1997**] A. Mallot. Behavior-oriented approaches to cognition : theoretical perspectives. Theory in biosciences n°116, 1997

[**Mathis, 2003**] P. Mathis. Graphes et réseaux: modélisation multiniveau. Editions Hermès, Paris 2003

[**Meyn et Tweedie, 1993**] S.P. Meyn, R.L. Tweedie. Markov Chains and Stochastic Stability.

New York Spring-Verlag, 1993

[**Naïm, et al., 2004**] P. Naïm , P-H. Wuillemain , P. Leray , O. Pourret , A. Becker. Réseaux bayésiens. Editions Eyrolles, Paris, 2004

[**Newell, 1990**] A. Newell. Unified Theories of Cognition. Harvard University Press, 1990

[**Pearl, 1986a**] J. Pearl. A constraint-propagation approach to probabilistic reasoning. In Uncertainty in Artificial Intelligence, Edition Elsevier Science, Amsterdam, 1986

[**Pearl, 1986b**] J. Pearl. Fusion, propagation, and structuring in belief networks. In Artificial Intelligence n°29, 1986

[**Pearl, 1987**] J. Pearl. Evidential reasoning using stochastic simulation of causal models. In Artificial Intelligence n°32, 1987

[**Pearl, 1987**] J. Pearl. Probabilistic reasoning in Intelligent Systems : Networks of Plausible Inference. Edition Morgan Kaufmann, San Francisco, 1988

[**Raftery et Tavaré, 1994**] A. E Raftery, S. Tavaré. Estimation and Modelling Repeted Patterns in High order Markov Chain with Mixture Transition Distribution Model. In Applied Statistics, vol. 43, 1994

[**Relieu et Quéré, 1998**] M. Relieu, L. Quéré. Mobilité, perception et sécurité dans les espaces publicsurbains. in Les Risques urbains : Acteurs systèmes de prévention. Collection VILLES, Paris, 1990

[**Robert, 1996**] C. Robert. Methodes de Monte-Carlo par chaînes de Markov. Economica, Paris, 1996

[**Robert-Bobée 2001**] I. Robert-Bobée. Modelling Demographic Behaviours in the French Microsimulation Model Destinie : an Analysis of Future Change in Completed Fertility, Insee document de travail n°G2001/14

[**Robert-Bobée 2002b**] I. Robert-Bobée. La programmation des événements démographiques dans Destinie, Insee note n°20/G211 26 juillet 2002

[**Saporta, 2006**] G. Saporta. Probabilité, analyse des données et statistique. Estimation, Monte-Carlo, Régression, Tests, Vraisemblance. Editions TECHNIP, Paris, 2006

[**Sardon, 1996**] J-P. Sardon. L'évolution du divorce en France. In Population, n°3, 1996

[**Thomas, 2005**] R. Thomas. Modèle de mémoire et de carte cognitive spatiales : application à la navigation du piéton en environnement urbain. Thèse de doctorat de l'Université de Rennes1, 2005

[**Toulemon, 1996**] L. Toulemon. La cohabitation hors mariage s'installe dans la durée. In Population n°3, mai-juin 1996

[**Vallin et Meslé, 2002**] J. Vallin, F. Meslé. Tables de mortalité françaises pour les XIXe et XXe siècles et projections pour le XXIe siècle. Editions PUF, Paris, 2002

[**Villeneuve-Gokalp, 1994**] C. Villeneuve-Gokalp. Constance et inconstances de la famille, Travaux et Documents de l'Ined, 1994

7

RÉSULTATS DE L'APPLICATION DU MODÈLE DE SIMULATION

Une expérience est une théorie mise en acte, un instrument, une théorie matérialisée, un concept scientifique, une théorie objectivée.

J.Ullmo

L'objectif de ce chapitre est de présenter quelques résultats obtenus à partir de l'application du modèle de simulation *VisualSimores* à une zone périurbaine du périmètre du SCoT (Schéma de Cohérence Territorial) du Grand Besançon (agglomération de 120 000 habitants située dans l'est de la France). Le terrain d'étude retenu est celui de la commune de Saône. Ce choix n'est pas anodin car avec une activité économique dynamique, cette commune présente également une forte attractivité pour les communes avoisinantes [Tannier et *al.*, 2006].

Après une description succincte de l'interface utilisateur de prototype de simulation, nous présentons brièvement la commune de Saône ainsi que les données utilisées pour calibrer le modèle de simulation

Enfin, trois scénarios de simulation de la mobilité résidentielle sont réalisés. L'un porte sur un "*cadre de vie agréable pour tous et un équilibre sociodémographique*", le deuxième s'intéresse à "*un cadre de vie de qualité moyenne pour tous et une moins bonne entente dans les familles*". Quant au troisième, il simule "*un cadre de vie agréable pour les propriétaires et de qualité moyenne pour les locataires et une bonne entente dans les familles*".

7.1. Présentation succincte du prototype *VisualSimores*

VisualSimores est le nom du programme informatique que nous avons développé à partir du couplage automates cellulaires et systèmes multi-agents pour simuler la mobilité résidentielle. C'est un programme entièrement graphique fonctionnant sous Windows et doté de menus et commandes dans le genre de Microsoft Office (donc facile d'utilisation car très intuitif) comme l'illustre la figure 7.1.

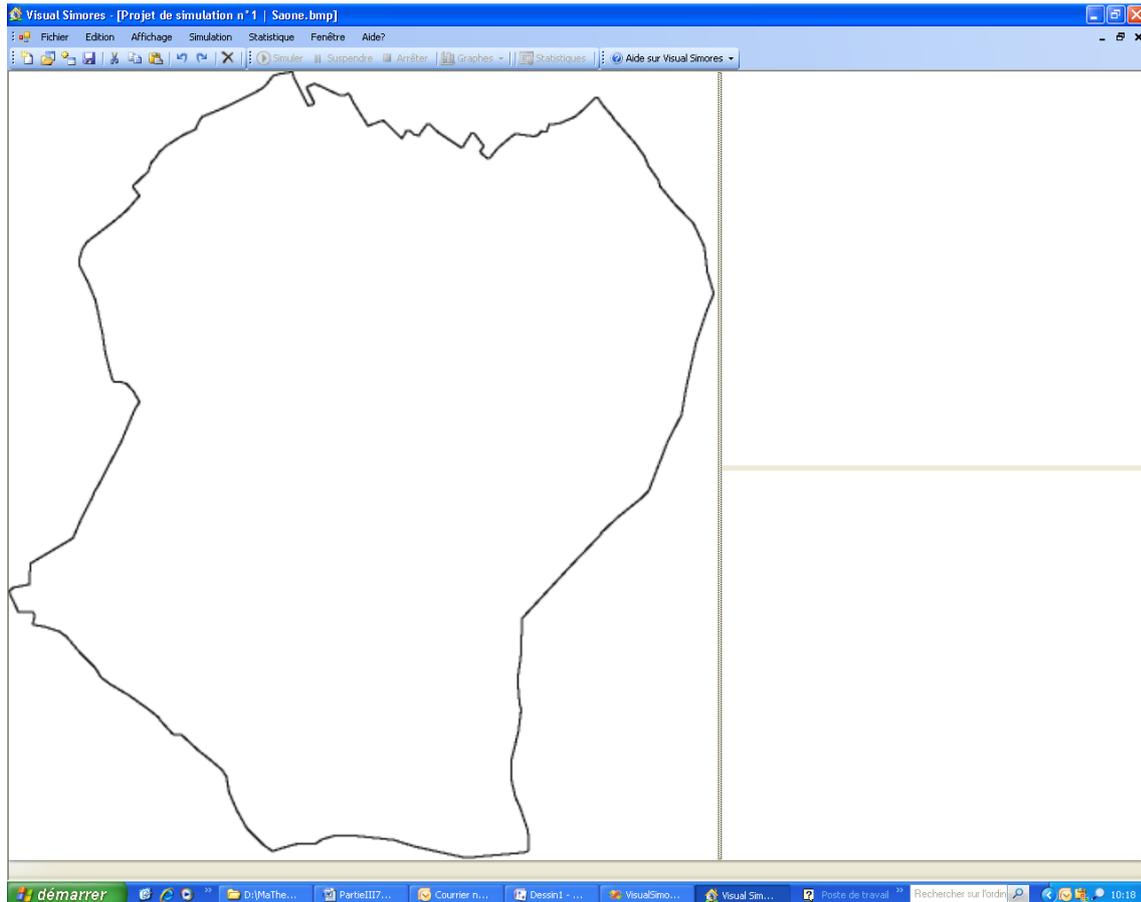


Figure 7.1 : *Interface utilisateur de VisualSimores*

La fenêtre de gauche est l'espace de travail où s'affiche la carte de la zone d'étude. La figure 7.1 présente la carte de la commune de Saône. C'est également dans cet espace que s'affiche la dynamique de l'automate cellulaire pendant le déroulement de la simulation. La fenêtre de droite (qu'on a la possibilité de masquer ou d'afficher en cliquant sur la commande *Volets 'Graphe et statistique'* à partir du menu *Affichage*) affiche les résultats statistiques concernant la dynamique des logements et aussi celle des ménages au cours de la simulation. La figure 7.2 présente une vue statique de

VisualSimores pour montrer les deux fenêtres principales après une simulation théorique.

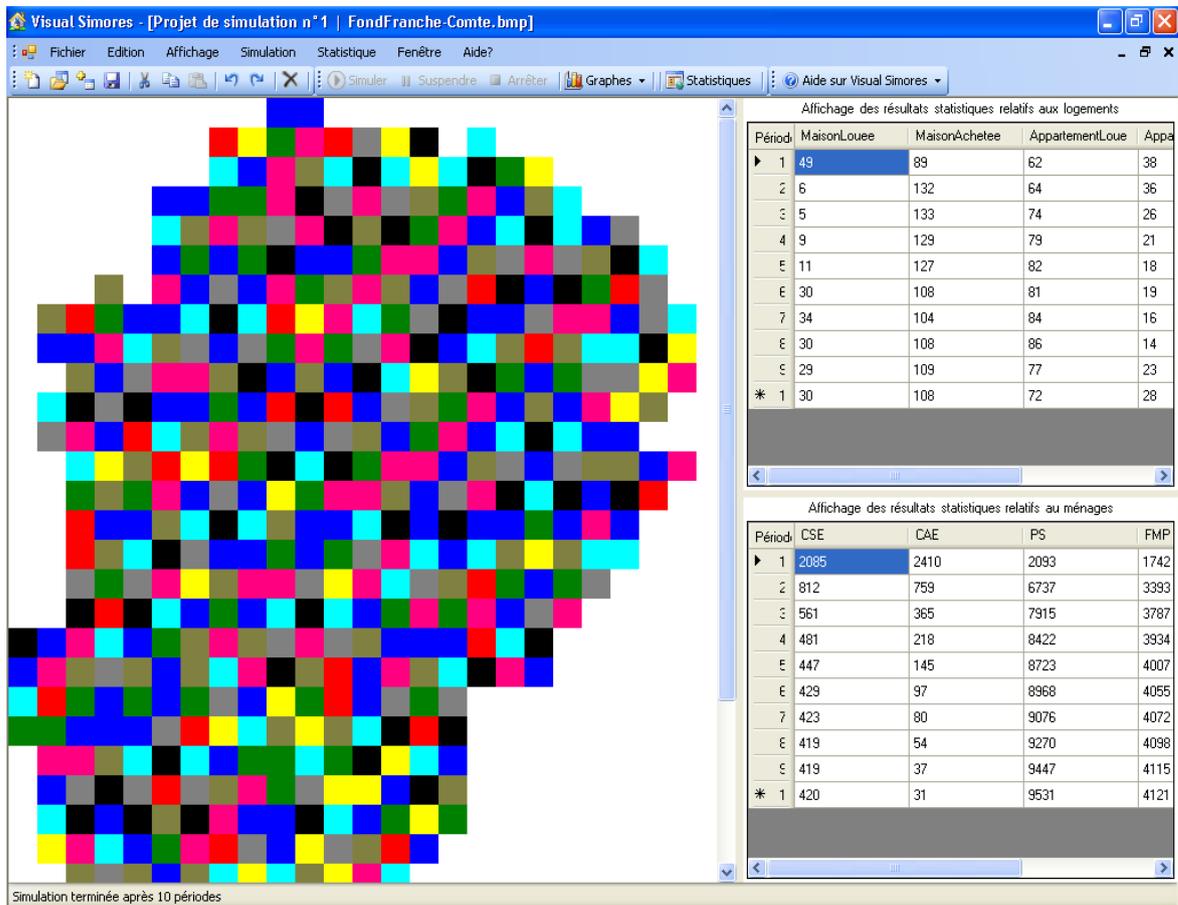


Figure 7.2 : Vue statique de *VisualSimores* après une simulation

Le paramétrage et l'entrée des données se font par l'intermédiaire d'une boîte de dialogue (cf. Figure 7.3) à laquelle on a accès en cliquant sur la commande "*Paramètres et données d'initialisation ...*" depuis le menu "*Simulation*". Comme on peut le voir, rien n'est figé ; toutes les valeurs sont modifiables. Les couleurs qui matérialisent l'occupation du sol dans l'automate cellulaire sont choisies par l'utilisateur du programme grâce à un clic gauche sur le bouton concerné.

Notons que le guide complet de l'utilisateur ainsi que la documentation technique du programme seront accessibles depuis la commande "*Documentation*" qui se trouve dans le menu *Aide* ?

Spécification des données et paramètres initiaux de simulation

Paramètres socioéco-spatio-démographiques du SMA

Taux	Valeur
Taux de décohabitation	0,90
Taux de dissolution	0,70
Taux des unions	0,60

Type d'agent	Effectif	Age moyen	Niveau du revenu moyen	Part des pi
Personnes seules	2997	29	Faible	
Couples sans enfant	2500	36	Moyen	
Couples avec enfant(s)	650	41	Moyen	
Familles mono-parentales	852	48	Faible	

Paramétrage des états statiques

Nom de l'état	Couleur à affecter
Eau	
Equipements	
Espace commercial	
Espace vert	
Réseau routier ou ferré	
Zone constructible	

dynamiques

Couleur à affecter	Valeur de la qualité environne
	0,90
	0,70
	0,70
	0,80

Paramètres spatio-temporels

Précisez la résolution spatiale qu'il faudra appliquer à l'automate cellulaire : 25 mètres

Précisez la durée totale durant laquelle il faudra exécuter la simulation : 10 années

Valider Annuler

Figure 7.3 : Interface de paramétrage et d'initialisation de VisualSimores

7.2. Le terrain d'application : la commune de Saône

Faisant partie des 59 communes de la Communauté d'Agglomération du Grand Besançon (CAGB), Saône est un bourg centre doté d'une zone commerciale et

industrielle et situé à 11 km de Besançon (cf. Figure 7.4), sur le premier plateau du Jura [Tannier et al., 2006, *op. cit.*]. D'une superficie de 21 km², elle compte en 2005, 3043 habitants. Un fort relief et une zone marécageuse séparent cette zone de Besançon. De ce fait, Saône remplit la fonction d'un lieu central pour les communes environnantes, de caractère plutôt rural. La commune est reliée à Besançon par le chemin de fer et par un axe routier important. Cette accessibilité routière sera encore améliorée par la construction d'un tunnel reliant la zone au contournement de Besançon.

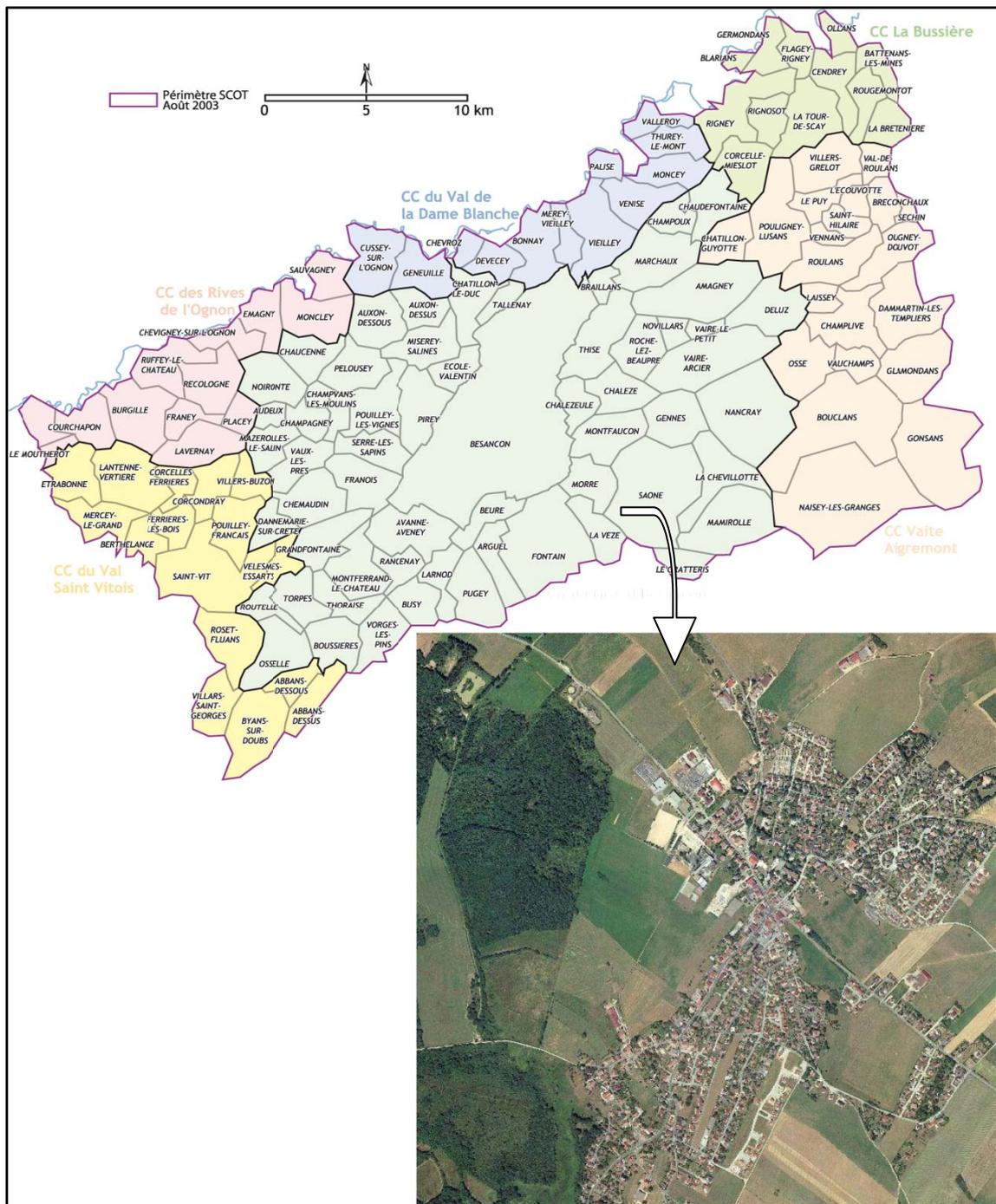


Figure 7.4 : Présentation de la zone d'application

7.3. Description des données de calibrage du modèle de simulation

La Communauté d'Agglomération du Grand Besançon a depuis 2001 la charge de gérer les transports sur son périmètre. Cette gestion nécessite une connaissance précise des pratiques de mobilité des habitants de l'agglomération. Dans cette optique, une Enquête Ménages Déplacements a été réalisée en 2004-2005 par la Communauté d'Agglomération du Grand Besançon dans le cadre d'un partenariat, associant l'INSEE de Franche Comté et l'AUDAB (Agence d'Urbanisme de l'Agglomération de Besançon) avec le soutien financier de l'Etat. Cette enquête décrit très finement l'organisation des déplacements sur le territoire, sur la base d'une méthodologie standard élaborée et continuellement mise à jour par le CERTU (Centre d'Etudes sur les Réseaux, les Transports, l'Urbanisme et les constructions publiques) et le CETE (Centre d'Etude Technique de l'Equipement). L'objectif de l'Enquête-Ménages-Déplacements est de recenser et de décrire les déplacements effectués par les habitants âgés de cinq ans et plus de l'agglomération bisontine un jour moyen de la semaine (hors périodes de vacances scolaires et jours fériés ou d'intempéries), pour répondre aux questions : qui se déplace, où, quand, comment et pourquoi se déplace-t-on ?

Ainsi, sur les 170 000 habitants du territoire en question, 5 715 personnes dont 2 577 ménages ont été interrogées et constituent l'échantillon de référence. Dans le protocole d'études, un ménage est considéré comme l'ensemble de personnes vivant dans un même logement quels que soient les liens qui les unissent. Un ménage peut comprendre une ou plusieurs personnes. Mais seule la personne de référence est interrogée.

Pour nos simulations nous avons, en ce qui concerne la commune de Saône, extrait de la base de données constituée à partir de cette enquête, les champs comportant les données quantitatives nécessaires aux expérimentations. Il s'agit notamment de :

- la composition du ménage,
- le revenu,
- l'âge,
- le statut d'occupation du logement habité ainsi que le type d'habitat (maison ou appartement).

Les données issues de l'extraction brute sont consignées dans le tableau 7.1.

Tableau 7.1 : Données brutes extraites de l'Enquête Ménages Déplacements

		Type de ménage		Total
		Personnes seules	Autres ménages	
Statut d'occupation	Locataires	31	23	54
	Propriétaires	0	68	68
Type d'habitat	Maisons	0	91	
	Appartements	31	0	
Niveau de revenu annuel (€)	Moins de 7000	31	0	
	7000 à 10000	0	31	
	30000 à 48000	0	23	
	Plus de 48000	0	37	
Total		31	91	

Sources : Enquête Ménages-Déplacement, AUDAB, 2005

D'autres sources d'informations relatives à la zone d'étude nous ont été indispensables pour compléter les données obtenues via cette enquête. Il s'agit notamment des deux tableaux de bord réalisés par l'Agence d'Urbanisme de l'Agglomération de Besançon [AUDAB, 2005 ; 2006]. Ces deux documents présentent les chiffres clés et les données de cadrage essentielles pour une plus grande connaissance de la Communauté d'Agglomération du Grand Besançon (CAGB) et ses 59 communes dont la commune de Saône, qui nous intéresse en particulier dans le cadre des simulations que nous avons réalisées. Le tableau 7.2 récapitule les données utilisées pour calibrer le modèle de simulation.

Tableau 7.2 : Récapitulatif des principales données de calibrage sans pondération

Type de ménage	Effectif	Age moyen	Niveau de revenu	Part des propriétaires de maison
Personne seule	31	27	Faible	0
Couple sans enfant	24	35	Moyen	28
Couple avec enfants	58	42	Elevé	78
Famille mono-parentale	9	38	Moyen	12
Total	122			

Tableau 7.2 : *Récapitulatif des principales données de calibrage sans pondération (suite)*

Type de ménage	Part des locataires de maison	Part des locataires d'appartement	Part des propriétaires d'appartement
Personne seules	0	0	100
Couple sans enfant	72	0	0
Couple avec enfants	22	0	0
Famille mono-parentale	88	0	0
Total			

Sources : Enquête Ménages-Déplacement, AUDAB, 2005 ; 2007

7.4. Analyse des résultats

L'ensemble des expérimentations du modèle sur la commune de Saône peuvent être regroupées en trois catégories. Chaque simulation est analysée sur une période de dix ans avec une situation de référence qui est celle de l'année 2005 (cf. Figure 7.4). Ainsi, nous allons décrire et commenter les résultats selon trois scénarios. Nous postulons qu'au-delà de 10 ans l'expérimentation de nos scénarios serait trop sujette à des transformations sociétales pour être valide. De ce fait, nos simulations sont réalisées sur une période allant de 2006 à 2015. Aussi, pour tous les scénarios la résolution spatiale est restée identique (nous avons pris une résolution spatiale de 30 mètres). Le passage du carroyage à la configuration initiale (qui est un modèle très proche de la réalité spatiale de la distribution des différents types de logement de la zone en 2005) à l'aide de *VisualSimores* est illustré par la figure 7.5. La figure 7.6 montre les différentes couleurs affectées à chaque type d'occupation du sol durant les simulations.

Cinq types d'occupation du sol (espace vert, zone constructible, maison en location, maison en propriété et appartement en propriété) sont utilisés dans les simulations. En effet, dans l'échantillon de l'enquête ne figurent pas de ménages occupant des appartements en location, et donc l'occupation du sol matérialisant cette catégorie de ménage n'est pas intégrée dans les simulations. Toutefois, nous souhaitons dans les recherches futures intégrer cette occupation du sol par le biais d'une pondération réalisée à partir des données INSEE (recensement).

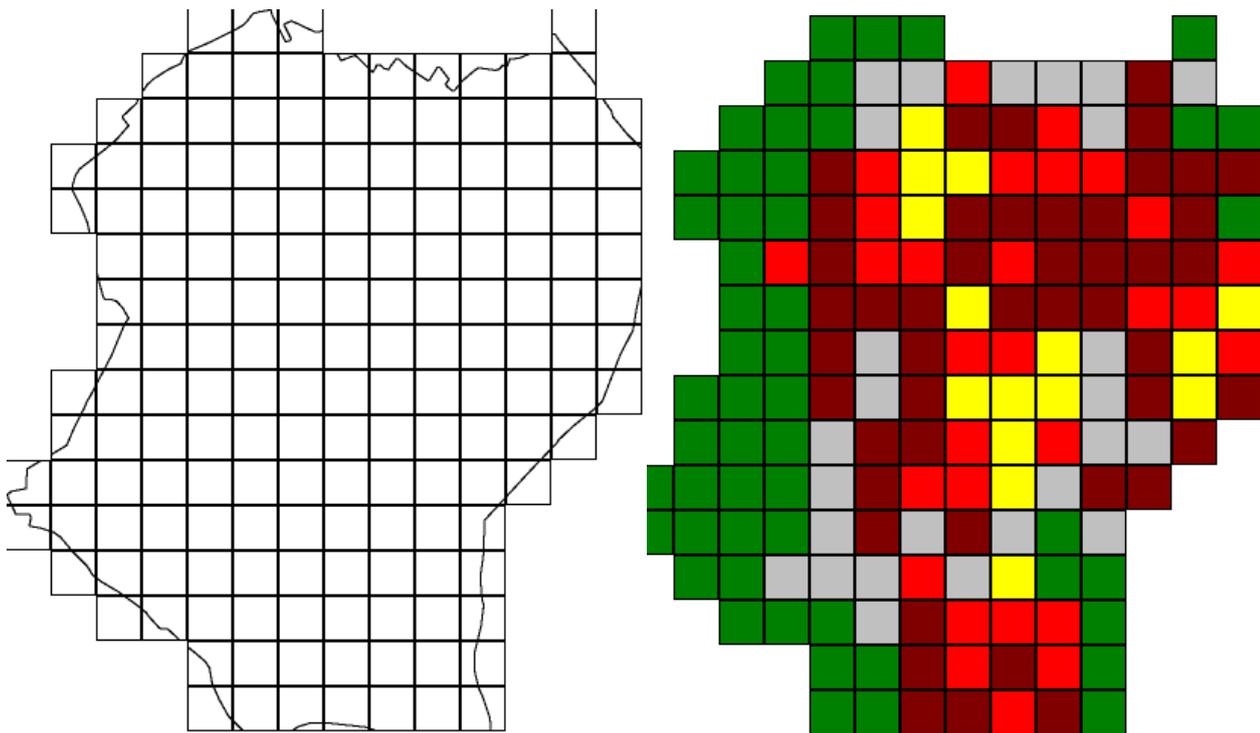


Figure 7.5 : Du carroyage à la configuration initiale de 2005

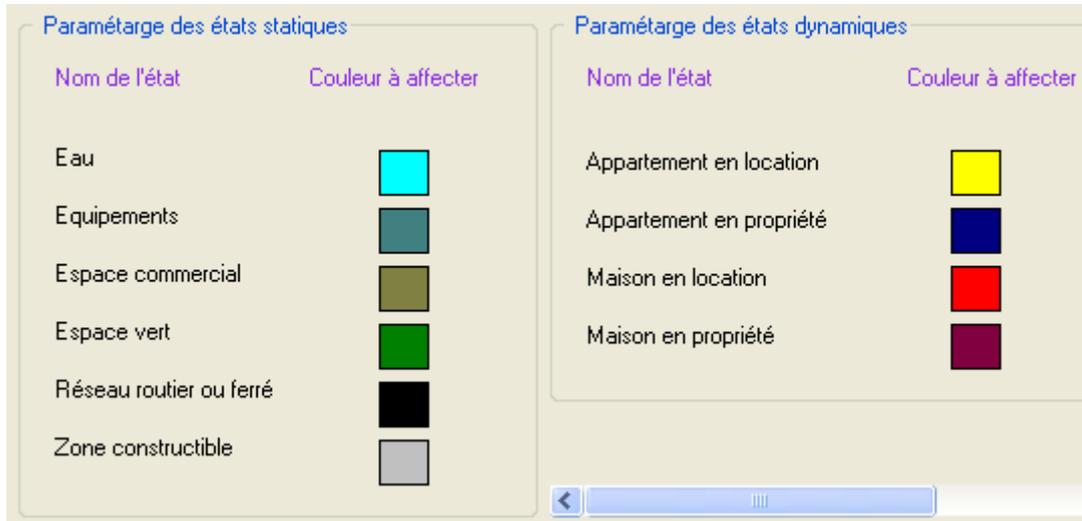


Figure 7.6 : Couleurs affectées aux différentes occupations du sol

Au chapitre précédent nous avons montré que les différents paramètres démographiques ($T_{\text{UnionDesPersonnesSeule}}$, $T_{\text{Décohabitation}}$ et $T_{\text{Dissolution}}$) conditionnent les évolutions démographiques des agents résidentiels (ménage) et que le comportement de ces derniers face aux choix de changement de logement est aussi influencé par le cadre de

vie. Ce paramètre est également accessible et modifiable dans *VisualSimores* sous le terme *Qualité environnementale* pour chaque type de logement.

Les trois scénarios à l'horizon 2015 sont donc basés sur la variation de ces différents paramètres pour traduire une certaine volonté politique d'aménagement du territoire.

7.4.1. Scénario 1 : un cadre de vie agréable pour tous et un équilibre sociodémographique

Le scénario 1 peut être résumé par l'idée selon laquelle l'ensemble des ménages est très satisfait de son logement (*Qualité environnementale = 1*) et dans le même temps, il existe une cohésion familiale très forte c'est-à-dire que le taux de dissolution des ménages est quasiment nul. Dans cette hypothèse, les simulations révèlent que l'habitat constitué par les appartements en location connaît une relative stabilité durant toute la période après une légère hausse entre 2005 et 2006. En réalité on constate dans la zone d'étude que ce type d'habitat est occupé en majorité par les ménages des catégories "*Personnes seules*" et "*Famille monoparentale*" durant toute la simulation. Cette situation s'observe également dans les résultats du scénario 2 et du scénario 3.

En revanche, l'habitat constitué par les maisons, connaît une dynamique fort intéressante (Figure 7.7). Entre 2005 et 2007 le nombre de maisons achetées par les ménages est resté constant avant de connaître une légère évolution entre 2007 et 2013 puis une inversion de tendance à partir de 2013 sans toutefois revenir à son état initial. En 2015 il n'y a plus de zone constructible ; ce qui signifie un probable processus de périurbanisation vers les communes alentours. Concernant les maisons en location, on observe une dynamique inverse à celle des maisons en propriété sur l'ensemble de la période de simulation.

Les résultats obtenus portent à croire qu'une politique d'aménagement du territoire visant à freiner la périurbanisation (la figure 7.8 donne une vision statique des résultats en 2015) pourrait se tourner vers un préalable consistant à mettre en application l'idée du scénario 1. Il s'agirait concrètement de travailler à la réduction des nuisances urbaines de tous genres (bruit, pollution, incivilité, insécurité, etc.) et de développer davantage d'aménités. Il faudra également, d'un point de vue sociodémographique, initier des mesures incitatives au maintien d'une forte cohésion familiale.

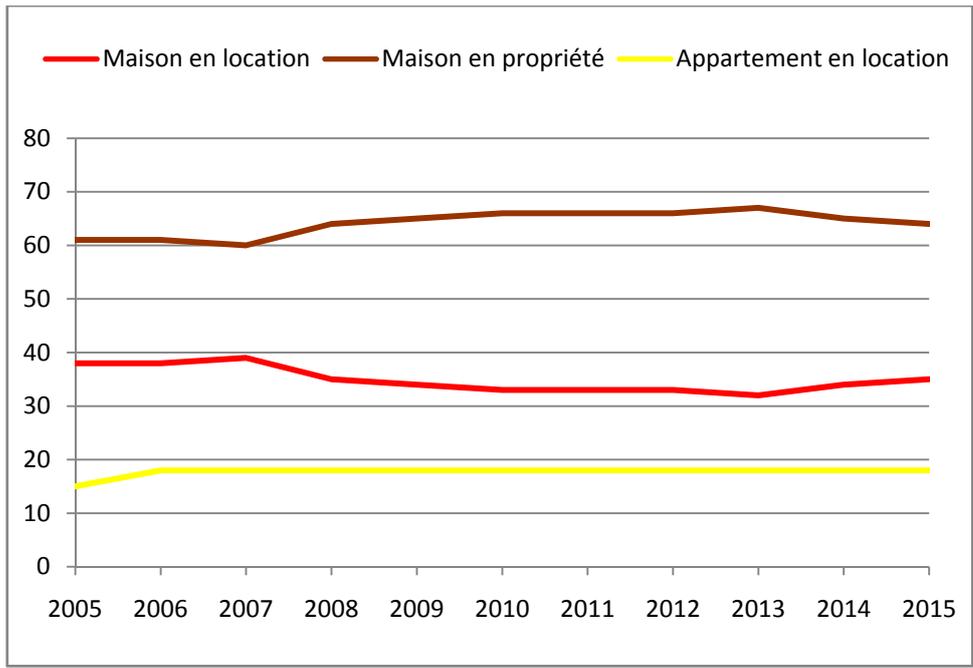


Figure 7.7 : Evolution de l'habitat dans le scénario 1

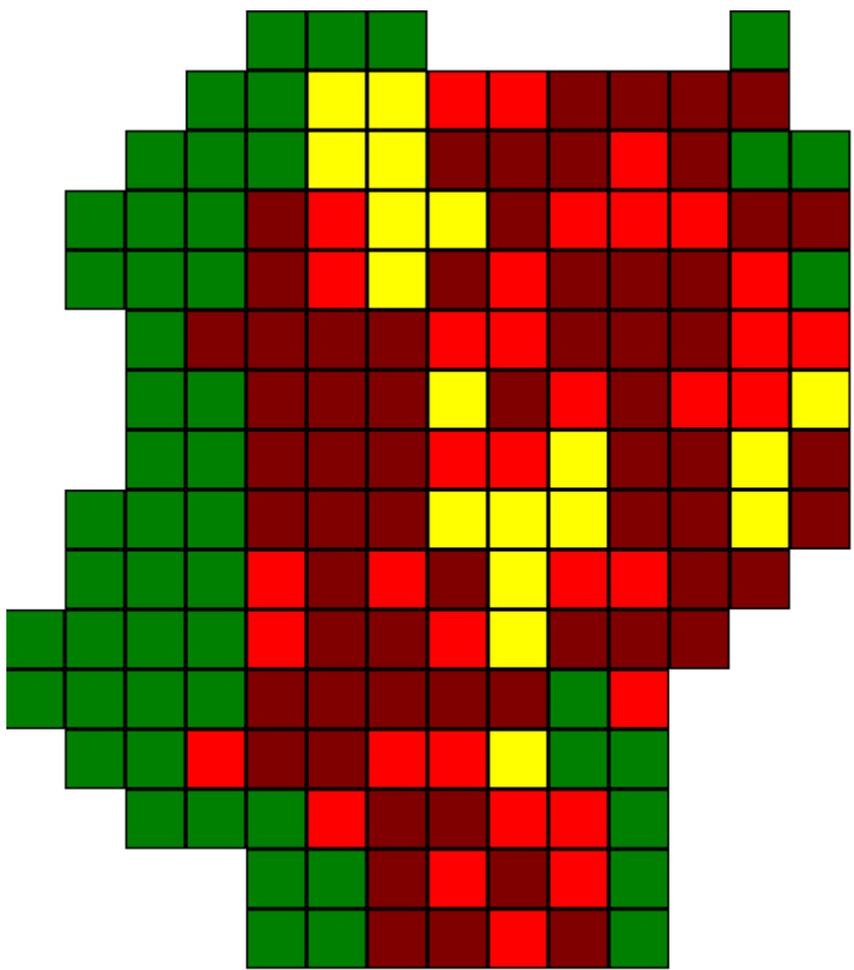


Figure 7.8 : Distribution spatiale de l'habitat en 2015 d'après le scénario 1

7.4.2. Scénario 2 : un cadre de vie de qualité moyenne pour tous et une moins bonne entente dans les familles

Avec une qualité environnementale = 0.5, ce scénario est moins optimiste que le précédent. La moins bonne entente familiale se traduit par le fait que le taux de dislocation familiale est supérieur à celui des unions. Aussi assiste-t-on à une tendance d'évolution prononcée et opposée entre la distribution de l'habitat constitué par les maisons en propriété et celle de l'habitat constitué par les maisons en location. Alors qu'on pourrait s'attendre à une diminution de l'expression d'un comportement orienté vers l'accession à la propriété en raison du fait que les familles en situation de déclin sont plus enclines à se loger dans le parc locatif [Vidberg et Tannier, 1999], les simulations ont révélé le contraire (cf. Figure 7.9). On obtient donc des résultats contre-intuitifs. L'habitat de type appartement se diffuse uniquement au Nord-Ouest de la commune, tandis que l'emprise spatiale de la maison en propriété est beaucoup plus marquée. Ce fait rejoint d'ailleurs le désir des Français "d'accéder à la propriété en maison individuelle". On voit d'ailleurs à l'heure actuelle, la mise en place de mesures gouvernementales pour accéder à l'achat de maison individuelle à moins de 100 000 euros (hors terrain).

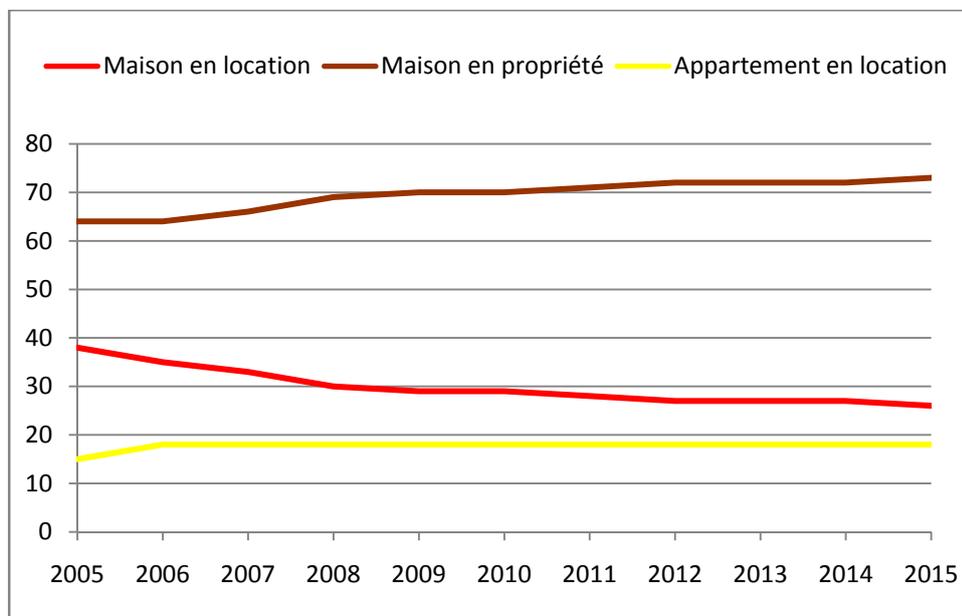


Figure 7.9 : Evolution de l'habitat dans le scénario 2

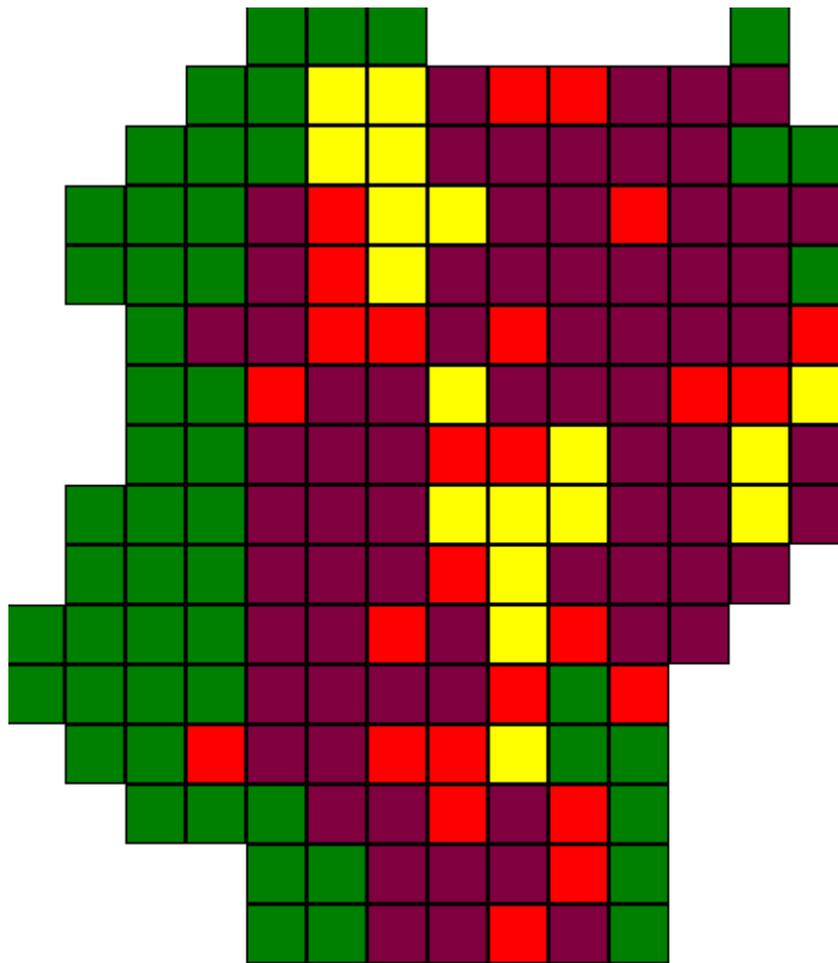


Figure 7.10 : *Distribution spatiale de l'habitat en 2015 d'après le scénario 2*

En effet, l'analyse des simulations de la distribution spatiale de l'habitat de 2005 à 2015 ne semble pas corroborer les conclusions de Vidberg et Tannier. En fait, sur une temporalité de 10 ans, nous n'observons pas une augmentation de l'habitat de type "appartement en location".

Paradoxalement, c'est l'habitat de type "maison en propriété" qui se diffuse. Face à ce résultat contre-intuitif, nous avons souhaité aller plus loin dans l'analyse. Pour ce faire, nous avons lancé les simulations d'après ce scénario sur une temporalité plus longue, soit jusqu'en 2020 (figure 7.11) en observant les ménages de type "Personnes seules" et "Familles monoparentales". Là encore, les résultats sont surprenants. L'année 2015 serait une année charnière, une année qui marquerait un changement de dynamique de la mobilité résidentielle pour cette population de ménages avec une augmentation des appartements et une diminution des maisons. On retrouve bien là les conclusions de Vidberg et Tannier, mais avec un décalage temporel relativement important.

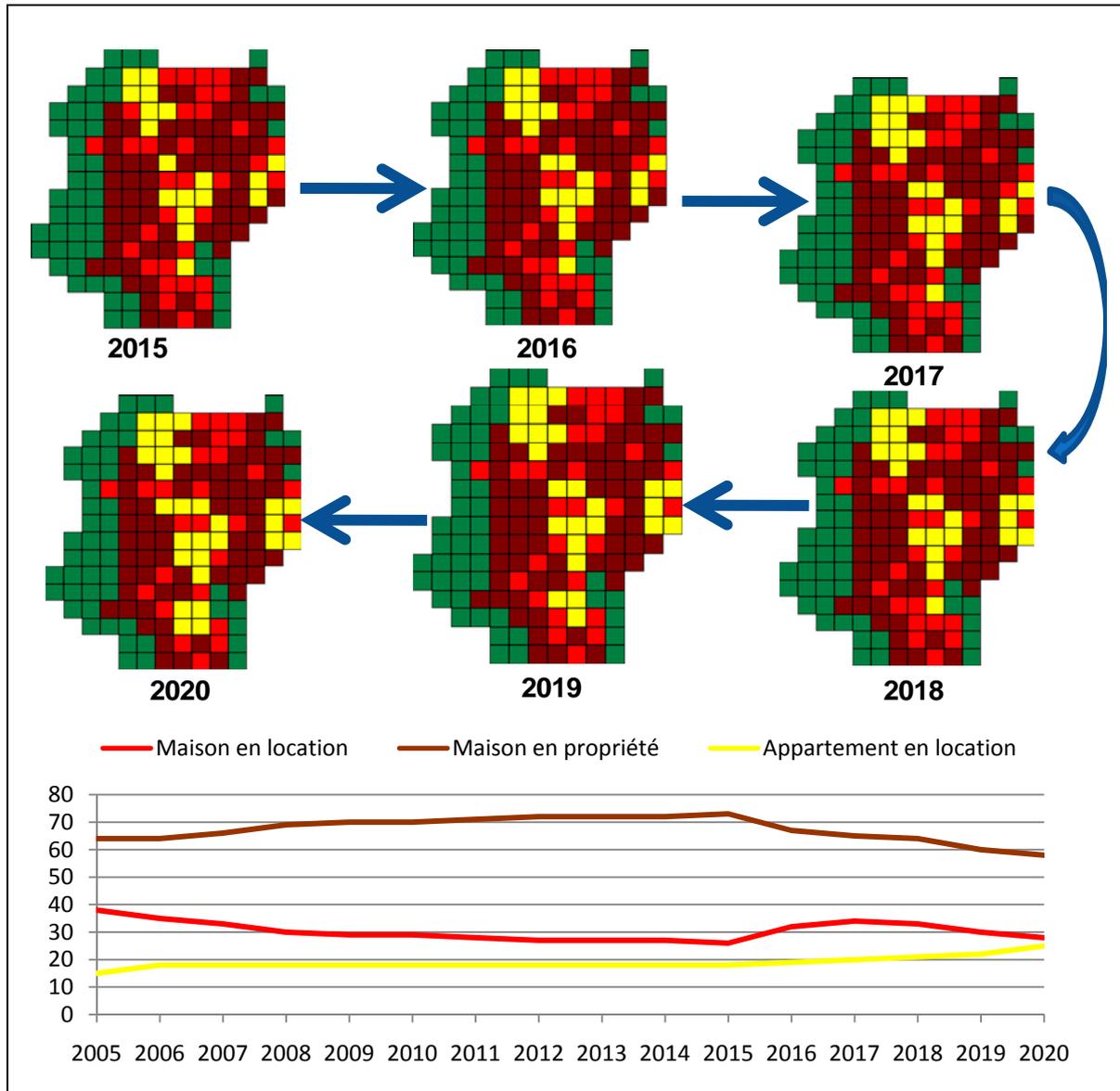


Figure 7.11 : Mise en évidence des résultats entre 2015 et 2020 d'après le scénario 2

Ces résultats contre-intuitifs nous amènent donc à penser à vérifier, dans nos travaux futurs, un éventuel biais du modèle ou un biais dû à la non prise en compte de l'habitat de type "appartement en propriété". Si aucun de ces biais ne se révèle, alors on pourrait expliquer ces résultats par la manifestation d'un *phénomène de seuil* quant aux résultats entre 2005 et 2015 ; et par l'émergence d'une éventuelle *bifurcation* (on vérifiera donc la présence des espaces de phase) en ce qui concerne les résultats obtenus pour la période allant de 2015 à 2020.

7.4.3. Scénario 3 : un cadre de vie agréable pour les propriétaires et de qualité moyenne pour les locataires et une bonne entente dans les familles

Dans ce scénario pseudo optimiste (*Qualité environnementale* = 1 pour les propriétaires et 0.5 pour les locataires) avec une cohésion familiale très forte (taux d'union supérieur au taux de dislocation), on observe à peu près la même dynamique entre maisons en locations et maisons en propriété comme dans le scénario précédent. La seule différence significative avec ce dernier au niveau des résultats est que dans le scénario 3 l'intensité de l'écart entre l'évolution des maisons en propriété et l'évolution des maisons en location est moindre. En effet il s'agit d'une *dynamique plus lente* dans le processus d'accès à la propriété (Figure 7.12).

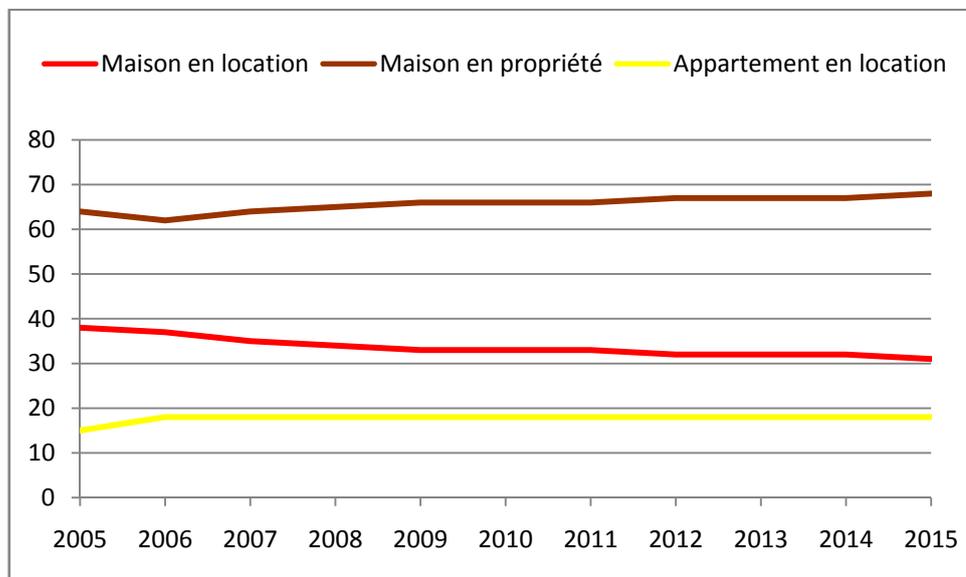


Figure 7.12 : Evolution de l'habitat dans le scénario 3

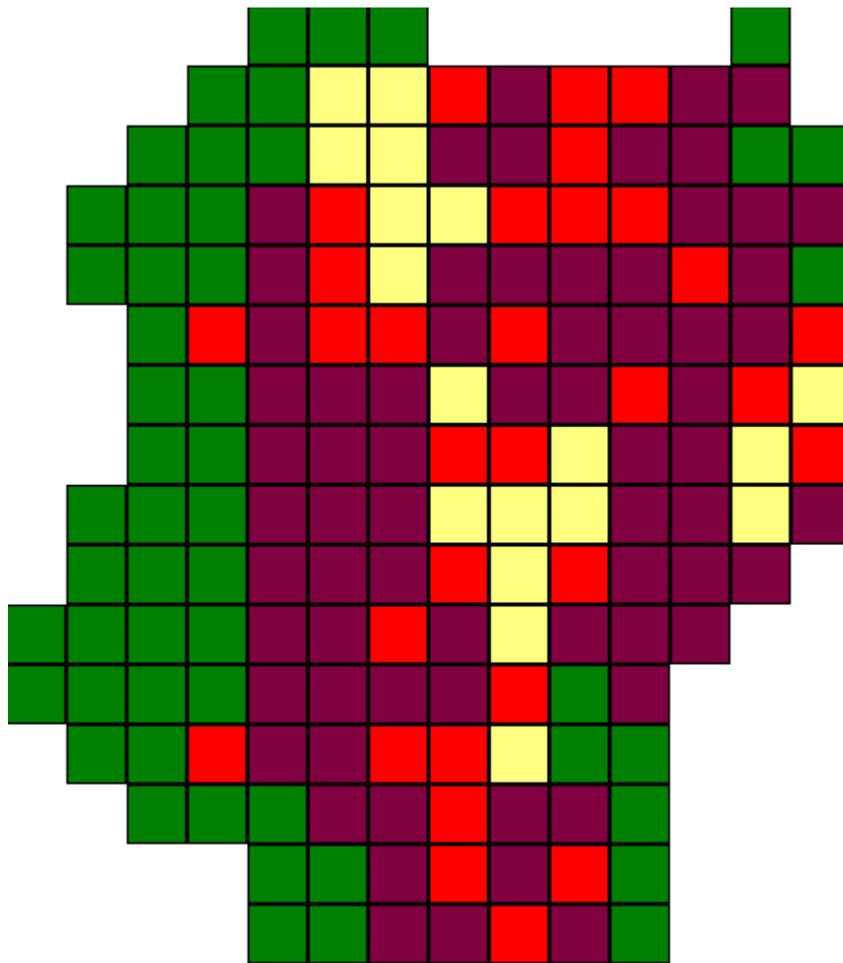


Figure 7.13 : *Distribution spatiale de l'habitat en 2015 d'après le scénario 3*

7.4.4. Synthèse

Au regard de ces analyses portées sur la commune de Saône, une réflexion à l'échelle du périmètre du SCoT de Besançon permet de mieux comprendre la poursuite de sa croissance démographique. Ce dynamisme est porté par les communes de moins de 10 000 habitants, alors que la ville centre connaît une légère baisse de population (au cours de la précédente décennie, la périphérie et la ville centre gagnaient des habitants). Par extrapolation, le territoire du SCoT (Besançon compris) gagne environ 1 000 habitants par an. En effet, les 83 communes périphériques sur lesquelles porte l'Enquête-Ménage-Déplacement comptent en 2006 un peu plus de 53 600 habitants, contre 47 600 en 1999, soit un gain de 6 000 habitants en 7 ans. Pendant la même période, la ville de Besançon voit sa population baisser de 2 000 habitants [AUDAB, 2007].

Il serait donc intéressant de lancer les simulations sur l'ensemble des communes du SCoT de Besançon et d'intégrer de nouvelles règles de comportement notamment des règles d'interaction spatiale entre les communes.

Le constat national concernant l'élargissement des zones d'influence des pôles urbains vaut pour Besançon. Si le rythme de croissance annuel des communes du SCoT a presque doublé depuis 1999 (+1,8% en moyenne entre 1999 et 2005 contre +1,07% entre 1990 et 1999), ce rythme augmente d'autant plus que l'on s'éloigne de la ville centre. Dans l'aire urbaine de Besançon, les communes distantes de 25 à 30 kilomètres du centre connaissent les taux de croissances les plus élevés. Ces communes accueillent les primo accédants venus de Besançon ou de sa proche périphérie.

Les résultats issus du dernier recensement sont identiques aux estimations réalisées avec l'aide d'autres sources. La DRE (Direction Régionale de l'Équipement) et l'AUDAB coopèrent depuis 2005 afin d'estimer la population en utilisant les fichiers de la taxe d'habitation. Leurs conclusions convergent avec celles du recensement quelle que soit la taille de la commune étudiée.

Par ailleurs, la demande de surface habitable par occupant augmente constamment ; un logement adapté à 4 personnes dans les années 60 convient aujourd'hui à un ménage de 3 personnes. De fait, malgré une évolution de l'offre nouvelle (hauteur moindre des bâtiments, espaces extérieurs mieux dessinés, meilleure organisation intérieure des logements, etc.), le parc proposé à Besançon ne peut accueillir tous les types de familles ; les ménages avec enfants, notamment les primo accédants, continuent de plébisciter la maison au détriment de l'appartement. Ainsi, ville perd progressivement une partie de ses ménages avec enfants au profit des communes du Grand Besançon, voire au-delà (celles du SCoT mais aussi celles de l'aire urbaine). Les ménages les plus modestes s'installent à plus de 20 kilomètres de la ville centre.

En somme, le modèle de simulation présente des avantages et des limites. Entre autres avantages nous pouvons noter :

- la relative stabilité dans les résultats de simulation ; ce qui pourrait confirmer la robustesse du modèle de simulation,
- la possibilité d'expérimenter et de proposer aux acteurs de l'aménagement du territoire un retour d'expérience à partir des scénarios de simulation réalisés.

En ce qui concerne les limites du modèle, on peut :

- se poser la question relative à la pertinence des règles régissant le comportement des ménages tant que d'autres simulations ne sont pas réalisées sur d'autres communes et à d'autres échelles,
- noter le problème de la représentation des objets spatiaux sous forme de cellule qui est finalement peu représentative de la réalité de la forme de l'espace.

Ce chapitre nous a permis de présenter de façon sommaire, l'interface utilisateur du prototype de notre modèle de simulation *VisualSimores*. A travers son application à la commune de Saône, nous avons mis en évidence à partir de trois scénarios que la mobilité résidentielle est étroitement liée à la structure sociodémographique des ménages ainsi que le cadre de vie offert par les services et équipements du lieu de résidence. Ces aménités sont modélisées par le paramètre “*Qualité environnementale*” du logement.

Mais l'appréhension de la dynamique socio-résidentielle ne passe pas par une simple superposition des dimensions spatiales et sociodémographiques. Car comme l'ont montré les résultats de simulation, à la difficulté de l'évaluation de chaque paramètre de façon isolé s'ajoute celle liée au nombre de possibilités dans leur combinaison pour formaliser un scénario plausible.

Les différentes expérimentations du modèle sur cette zone d'étude ont révélé des points fort intéressants de l'approche “Couplage AC-SMA”. Ces expériences nous ont aussi permis de prendre conscience de quelques limites non pas de l'approche mais du modèle de simulation lui-même.

Bibliographie référencée

[AUDAB, 2005] AUDAB. Tableau de bord de l'agglomération, Besançon, mai 2005

[AUDAB, 2006] AUDAB. Tableau de bord. Chiffres clés, communauté de communes du SCoT de l'agglomération bisontine, Besançon, octobre 2006.

[AUDAB, 2007] AUDAB. Le recensement de la population, Besançon, février 2007.

[Tannier et al., 2006] C. Tannier, P. Frankhauser, H. Houot, G. Vuidel. Optimisation de l'accessibilité aux aménités urbaines et rurales à travers le développement de modèles fractals d'urbanisation. XLII ° Colloque de l'ASRDLF – XII° Colloque du GRERBAM, Sfax, 4-6 Septembre 2006

[Vidberg et Tannier, 1999] S. Vidberg, C. Tannier. Urban location strategies. Some elements for a best understanding. Document de travail, Laboratoire ThéMA, Besançon, 1999

CONCLUSION

Mais je ne veux pas pousser mon opération plus loin qu'une certaine limite : j'obtiendrai des villes trop vraisemblables pour être vraies.

I. Calvino.

En choisissant de mener nos recherches doctorales sur la modélisation et la simulation multi-agents de la dynamique urbaine, nous savions que nous nous inscrivions dans un domaine de recherche scientifique en pleine expansion à plusieurs égards. Aussi notre ambition était de contribuer à la réalisation d'outils et d'approches méthodologiques et conceptuelles de la mobilité résidentielle. Cette dernière a été appréhendée à partir des relations qu'entretiennent les habitants avec leur habitat. Cette recherche propose un modèle à base d'agents qui simulent la dynamique de la mobilité intra-communale. Le modèle, qui tourne sur la commune de Saône (Est de la France), est implémenté dans le logiciel d'expérimentation *VisualSimores* (un CD-ROM est fourni). Notre travail de recherche a pu fournir des apports d'ordre conceptuel et méthodologique pour comprendre les dynamiques urbaines.

Apports conceptuels et méthodologiques

L'espace urbain est un lieu d'expression qui se différencie par sa capacité à répondre aux besoins et attentes de personnes de toutes conditions. Ainsi, face à une société urbaine de plus en plus complexe et difficile à saisir, les aménageurs doivent apporter de nouveaux éléments de réponses aux préoccupations et aspirations des ménages en ce qui concerne l'habitat et les aménités qu'il offre. L'un des moyens de tester des solutions d'aménagement est de recourir aux simulations afin d'évaluer des scénarios et d'expérimenter, par voie informatique, l'impact des politiques locales de l'habitat et des politiques urbaines.

“Dis-moi où tu habites, je te dirai qui tu es.” Tel est le titre de l'un des articles de Maryse Marpsat (1988), consacrés à l'analyse économique et sociale des comportements de localisation des ménages. Cela signifie qu'un lieu d'habitation peut révéler les caractéristiques économiques et sociales des individus qui y résident. Deux analyses sont alors possibles : soit on estime que les individus choisissent leur lieu de résidence en fonction de leurs caractéristiques économiques et sociales (approche de type système multi-agents), soit on suppose que les caractéristiques des lieux suggèrent aux ménages certains lieux de résidence (approche automate cellulaire). Dans le premier cas, on met l'accent sur les préférences spatiales des individus, tandis que dans le second cas, on privilégie les caractéristiques économiques et spatiales des lieux.

Dans notre travail de recherche, nous avons plutôt choisi de combiner ces deux aspects de la problématique : tenir compte à la fois des préférences spatiales des ménages en ce qui concerne leurs choix résidentiels et des caractéristiques socio-économiques et spatiales des lieux. Ainsi, d'un point de vue conceptuel, la modélisation du système résidentiel s'est appuyée sur le couplage entre un automate cellulaire (AC) et un système multi-agents (SMA). L'automate cellulaire étant le support spatial donc les différentes occupations du sol, les agents cognitifs du système multi-agents modélisent les différents types de ménages. Les diverses interactions quant à elles, sont formalisées selon une approche probabiliste axée sur les réseaux bayésiens.

En ce qui concerne l'approche méthodologique que nous avons développée au quatrième chapitre, elle constitue un canevas pour la modélisation orientée agents en

géographie. Elle tient compte et explique l'ensemble de la chaîne de cohérence des étapes de modélisation des problématiques spatio-temporelles depuis l'analyse systémique jusqu'à l'implémentation mathématique et informatique du modèle de simulation en passant par l'identification et la conception architecturale des différents types d'agents constitutifs de chacun des sous-systèmes. Cette démarche méthodologique se déroule selon un processus unifié et itératif lors de la modélisation des systèmes complexes. En adoptant cette approche, nous avons développé le prototype logiciel (*VisualSimores*) du modèle de simulation qui présente une interface de calibrage simple et évolutive avec de réels potentiels d'adaptation thématique.

Les potentialités du prototype de simulation

La modélisation et la simulation à base d'agents s'intéressent aux systèmes complexes. En géographie, l'objectif est de reproduire la dynamique d'un système spatio-temporel réel en modélisant les entités par des agents, dont le comportement et les interactions sont définis. Dans notre travail de recherche, nous nous sommes plus particulièrement intéressés à la réalisation d'un modèle de simulation de la mobilité résidentielle. Le logiciel permet d'analyser le fonctionnement du marché de logement notamment à travers les effets de chaîne des déménagements-emménagements. .

Aussi, les résultats obtenus aux travers des simulations que nous avons réalisées sur la commune de Saône confirment que la mobilité résidentielle et le choix de lieu de résidence sont fortement liés d'une part aux caractéristiques économiques et sociodémographiques des ménages concernés et d'autre part au différentiel entre les contraintes et les avantages que peut offrir les sites potentiels d'accueil. Un point intéressant des résultats de simulations concerne le scénario de type 2 qui a, plus particulièrement, attiré notre attention. En effet, il résulte du constat selon lequel les ménages en "situation fragile" ont un comportement résidentiel inattendu durant les dix premières années de la simulation et un comportement résidentiel "normal" à partir de la onzième année de la simulation. Ce résultat contre-intuitif nécessite par la suite de mener des investigations plus approfondies.

Mais au regard des simulations effectuées, de nombreux problèmes restent à résoudre ; ce qui nous amène à énoncer quelques limites et perspectives de recherche.

Limites et perspectives de recherche

Pour énoncer ces perspectives, il faut une lecture critique du travail accompli. Comparativement aux contributions apportées beaucoup de questions restent en suspens. Trois limites d'inégale importance apparaissent.

La première limite concerne la validation du modèle, validation qui présente des difficultés lors de l'application des modèles à base d'agents. Commençons par évoquer le problème de la validation rétrospective et de la validation prospective du modèle. Pour ce qui est de la validation rétrospective, nous envisageons de lancer d'autres simulations à la fois sur la commune de Saône mais aussi sur l'ensemble de la Communauté d'Agglomération du Grand Besançon en utilisant des données historiques. Ce faisant nous serons plus à même de tester la robustesse du modèle et aussi de pouvoir procéder à sa validation rétrospective. De plus, il serait intéressant d'appliquer le modèle de simulation à d'autres communes d'autres régions d'après les mêmes scénarios à des fins de comparaison. Et, pour mettre en évidence les processus d'auto-organisation et d'émergence entre différents niveaux d'organisation spatiale, il aurait été utile de considérer des zones d'application plus grandes et de faire varier la résolution spatiale des cellules tout en considérant les mêmes scénarios. Pour ce qui est de la validation prospective, nous pensons qu'il serait fort utile de faire tourner le modèle selon plusieurs scénarios afin de rechercher et d'identifier les structures permanentes, reflétant des configurations spatiales plausibles en accord avec les hypothèses de chaque scénario, pouvant générer des règles de comparaisons.

La deuxième limite est relative à la thématique de la recherche et à l'intégration des politiques d'aménagement du territoire dans les scénarios de simulation. Notre modèle de simulation de la mobilité résidentielle des ménages laisse la possibilité d'enrichir le modèle pour prendre en compte la mobilité quotidienne des ménages. L'objectif étant, à terme, d'étendre le modèle pour une prise plus globale des problématiques de mobilité (mobilité résidentielle, mobilité quotidienne, voyage et migration). A terme, on pourrait également étudier l'impact des constructions neuves sur un marché local afin de mieux mesurer les effets des politiques locales ou départementales de l'habitat. Dans ce travail, nous nous sommes limités à la mobilité résidentielle. Or l'analyse de la dynamique urbaine sous l'angle de mobilité devrait s'élargir également à la mobilité quotidienne.

En effet, la mobilité quotidienne connaît, depuis une trentaine d'années en France, une évolution principalement géographique. Les bassins de vie débordent largement des limites de la ville morphologique et, la commune est loin de constituer l'enveloppe de la vie quotidienne de ses habitants. Ainsi on pourrait compléter les règles d'interaction spatiale à intégrer au modèle de simulation.

De plus, les scénarios de simulation réalisés ont pu intégrer le rôle des politiques d'aménagement du territoire sur les dynamiques urbaines. À terme, nous souhaiterions donc étudier l'impact des nouvelles constructions.

Enfin, aux plans méthodologiques et conceptuels, nous pensons qu'il serait très intéressant d'étudier la possibilité de modéliser les cellules non plus comme telle mais comme de véritables agents réactifs dotés de capacités géométriques en mode vectoriel. Ainsi, elles pourront changer de forme et de dimensions de façon contextuelle (changement de niveau d'organisation et/ou d'échelle spatiale) pour une représentation spatiale proche de la réalité morphologique des zones d'étude. Une réflexion de fond devra être aussi menée sur la formalisation multi-agents des interactions entre entités géographiques.

Ces quelques pistes de recherche et d'approfondissement que nous venons d'évoquer ne sont qu'une infime partie de l'ensemble des investigations possibles et nécessaires pour de meilleures pratiques de modélisation et de simulation multi-agents en géographie. Notre recherche n'a fait qu'effleurer ce domaine et nous espérons pouvoir poursuivre par la suite.

Bibliographie générale

[Agbossou, 2004] I. Agbossou. Conception d'un système d'aide à la décision en localisation spatiale : concepts, formalisation et bases méthodologiques. Mémoire de DEA, Université Louis Pasteur de Strasbourg I, 2004.

[Agbossou, 2006] I. Agbossou. Modèles d'agents pour la simulation urbaine : méthodologie, architecture et formalisme, XXIIèmes journées de l'Association Tiers-Monde URGENCE, SOLIDARITÉ, GOUVERNANCE ET DÉVELOPPEMENT. ARRAS, 22-24 mai 2006

[Agbossou, 2007] I. Agbossou. VisualSimores: un outil de simulation multi-agents de la dynamique urbaine à base d'automates cellulaires. Méthodologie de conception, algorithmes et application. RTP Modélisation et Dynamiques Spatiales (MoDyS) ; 2ème Rencontre de doctorants, Avignon 19-20 décembre 2007

[Alexander et al., 1997] C. Alexander, S. Ishikawa, M. Silverstein. A Pattern. Language-Towns-Building-Construction. Oxford University Press, 1997

[Allemand et al., 2004] S. Allemand, F. Ascher, J. Levy. Les sens du mouvement. Modernité et mobilités dans les sociétés urbaines contemporaines. Colloque de Cerisy/Institut pour la ville en mouvement, 2004

[Allen et al., 1986] P. M. Allen, G. Engelen, M. Sanglier. Self-organizing systems and the 'laws of socio-economic geography'. In European Journal of Operational Research, 1986

[Allen et Sechet, 1988] B. Allen, P. Sechet. Les processus d'installation dans l'habitat. Paris, 1988

[Alligood et al., 1996] K. Alligood, D. Sauer, A. Yorke. Chaos-An Introduction to Dynamical Systems. New York. Springer, 1996

[Alves et al., 2002] S. Alves, M. Oliveira Neto, M. Martins. Electoral surveys' influence on the voting processes : a cellular automata model. Physica, 2002

[Anas, 1982] A. Anas. Residential location markets and urban transportation: economic theory, econometrics and Policy analysis with discrete choice models. New York Academic Press, 1982

[Andrieux, 1989] D. Andrieux. Mobilité professionnelle et mobilité géographique: Similitudes et différences de comportement de quelques catégories d'actifs. Economie méridionale, 1989.

[Antoni, 2003] J-P. Antoni. Modélisation de la dynamique de l'étalement urbain. Aspects conceptuels et gestionnaires. Application à Belfort. Thèse de doctorat de géographie. Université Louis Pasteur de Strasbourg I. Strasbourg, décembre 2003. Disponible sur : <http://eprints-scd-ulp.u-strasbg.fr:8080/10/10/htm/index-frmas.html> (consulté le 04.01.2005)

[Arnott, 1985] R.J. Arnott. Hopsim: A housing policy simulation model (mimeo), Kingston, Ontario: Queen's University, 1985

[Aschan et al., 2000] C. Aschan, H. Mathian, L. Sanders, K. Mäkilä. A spatial microsimulation of population dynamics in Southern France: a model integrating individual decisions and spatial constraints. In Applications of Simulation to Social Sciences. Editions Hermès. Paris, 2000

[Ashby, 1956] W. R. Ashby. An introduction to cybernetics. Editions Chapman & Hall. London 1956

[Aubry, 1988] B. Aubry. Les migrations interrégionales depuis 30 ans : de l'attirance à l'indifférence... et vice versa. *Economie et statistique* n° 20, 1988

[AUDAB, 2005] AUDAB. Tableau de bord de l'agglomération bisontine. Chiffres clés. Communauté d'Agglomération du Grand Besançon, 2005

[AUDAB, 2006] AUDAB. Tableau de bord. Chiffres clés, communauté de communes du SCoT de l'agglomération bisontine, Besançon, octobre 2006.

[AUDAB, 2007] AUDAB. Le recensement de la population, Besançon, février 2007.

[Badariotti et Weber, 2002] D. Badariotti, C. Weber. La mobilité résidentielle en ville. Modélisation par automates cellulaires et système multi-agents à Bogota. *L'espace géographique* n°2, 2002

[Batty, 2001] Models in planning : technological imperatives and changing roles. In *International Journal of applied Earth Observation and Geoinformation*, 2001

[Batty et Torrens, 2001] M. Batty, M. Torrens. Modeling complexity : the limits to prediction. In *CyberGeo* n°201, 2001

[Batty, 1998] M. Batty. Urban evolution on desktop: simulation with the use of extended cellular automata. In *Environment and Planning A* 30, 1998

[Batty et al., 1997] M. Batty, H. Couclelis, E. Eichen. Urban systems as cellular automata. In *Environment Planning B-Planning & Design*, 1997

[Batty et Xie, 1994] M. Batty, Y. Xie. From Cells to Cities. In *Environment and Planning B* 21, 1994

[Batty, 2005] M. Batty. Cities and Complexity. Understanding Cities with Cellular Automata, Agent-Based Models, and Fractals. The MIT Press, 2005

[Baumont, 1993] C. Baumont. Analyse des espaces urbains multicentriques. La localisation résidentielle. LATEC, CNRS, Université de Bourgogne, 1993.

[Bazzan et Klügl, 2003] A. Bazzan, F. Klügl. Route Decision Behaviour in a Commuting Scenario: Simple Heuristics Adaptation and Effect of Traffic Forecast. Euroworkshop on Behavioural Responses to ITS. Eindhoven, 2003

[Beaumont et al., 2000] C. Baumont, P-P. Combes, P-H. Derycke, H. Jayet. Économie géographique. Les théories à l'épreuve des faits. Editions Economica, Paris, 2000.

[Béguin et Pumain, 1994] M. Béguin, D. Pumain. La représentation des données géographiques. *Statistique et cartographie*. Editions Armand Colin. Paris 1994

[Bellanger et Marzloff, 1996] F. Bellanger, B. Marzloff. Transit, Éditions de l'aube, La Tour d'Aigues, 1996.

[Benati, 1997] S. Benati. A cellular automaton for the simulation of competitive location. In *Environment and Planning B-Planning & Design*, 1997

[Benenson, 2004] I. Benenson. Agent-based modelling : from individual residential choice to urban residential dynamics. In *Spatially Integrated Social Science: Examples in Best Practice*. Oxford University Press. Oxford, 2004

[Benenson, 2001] I. Benenson. OBEUS : Object-Based Environment for Urban Simulation. 6th International Conference on GeoComputation. University of Queensland, Brisbane, Australia, 2001. Disponible sur <http://www.geocomputation.org/2001/papers/benenson.pdf> (Consulté le 23.05.2006)

[Benenson, 1999] I. Benenson. Modeling population dynamics in the city: from a regional to multi-agent approach. In *Discrete Dynamics in Nature and Society* n°3, 1999

[Benenson et Torrens, 2004] I. Benenson, P.M. Torrens. Géosimulation. Autoamata-based of urban phenomena. Editions Wiley. England 2004. Reprinted june 2005

[Bensaid, 2003] L. Bensaid. Simulation multi-agent des comportements des consommateurs dans un contexte concurrentiel. Thèse de l'université Pierre et Marie Curie. Paris, juin 2003

[Berec, 2002] L. Berec. Technics of spatial explicit individual-based models: construction, simulation and mean-field analysis. In *Ecological Modelling* (150), 2002

[Berroir et al., 1996] S. Berroir, N. Cattant, T. Saint-Julien. La structuration des territoires de la ville, entre agglomération et aire polarisée. Document de travail. EquipePARIS, CNRS. Université de Paris I, 1996

[Berry, 1964] B.J.L. Berry. Cities as systems within system of cities. Papers in Proceedings of the Regional Sciences Association vol. 13, 1964

[Berry, 1961] B.J.L. Berry. A method for deriving multiple factor uniform regions 1961

[Bonnet et al., 1999] C. Bonnet, C. Burricaud, C. Colin, A. Flipo, R. Mahieu, P. Ralle, B. Sédillot. Le modèle de microsimulation dynamique : DESTINIE. Département des Etudes Economiques d'Ensemble, Malakoff, 1999

[Bonvalet, 1987] C. Bonvalet. Les parisiens dans leur maturité : origine, parcours, intégration. In *Population* n°3, 1987

[Bonvalet et Gotman, 1993] C. Bonvalet, A. Gotman. Le logement, une affaire de famille. Editions L'Harmattan, 1993

[Bonvalet et Brun, 2002] C. Bonvalet, J. Brun. Etat des lieux des recherches sur la mobilité résidentielle en France in *L'accès à la ville : les mobilités spatiales en questions*, Paris ; Budapest ; Torino, L'Harmattan, 2002

[Bordin, 2002] P. Bordin. SIG : concepts, outils et données. Editions Hermès-Lavoisier. Paris, 2002

[Bura et al., 1993] S. Bura, F. Guérin-Pace, H. Mathian, D. Pumain, L. Sanders. Multi-Agents Systems and the Dynamics of a Settlement System. In *Simulation Societies Symposium*. Siena, 1993

[Burkhardt et al., 2004] J. Burkhardt, S. Donikian, Y. Duthen, O. Héguy, D. Lourdeau, T. Morineau, M. Parenthoën, C. Sanza, J. Tisseau. Action spécifique humain virtuel : vers un humain synthétique temps-r éel aussi vrai que nature. Rapport technique, CNRS, 2004

[Cardon, 2004] A. Cardon. Modéliser et concevoir une machine pensante : Approche de la conscience artificielle. Edition Vuibert, Paris 2004

[Casare et Sichman, 2005] S. Casare, J.S. Sichman. Towards a functional ontology of

reputation. In International Joint Conference on Autonomous Agents and Multi-Agent Systems AAMAS, 2005

[Castelfranchi, 1990] C. Castelfranchi. Social Power : A Point Missed in Multi-Agent, DAI, and HCI. In Decentralized Artificial Intelligence: Proceedings of the first European Workshop on Modelling Autonomous Agents in a Multi-agent World (MAAMAWA'89). Amsterdam, 1990

[Cavailhès et al., 2004] J. Cavailhès, P. Frankhauser, I. Thomas. Where Alonso meets Sierpinski : An urban economic model of a fractal metropolitan area. In Environment and Planning A, Vol. 36, 2004

[Certu, 2002] Certu. Quelle est la répartition spatiale des différents types de logements et son évolution ? Programme ACTEUR, 2002

[Chamboredon et Lemaire, 1970] J-C. Chamboredon, M. Lemaire. Proximité spatiale et distance sociale. In Revue Française de Sociologie n°1 Paris, 1970

[Chardonnel, 2001] S. Chardonnel. La time-geography : les individus dans le temps et dans l'espace. In Modèles en analyse spatiale. Editions Hermès. Paris 2001

[Chombart De Lauwe, 1963] H. Chombart De Lauwe. La vie sociale dans les grands ensembles d'habitation. In Logement n°150, 1963

[Clark et Onaka, 1983] W.A.V. Clark, J.L. Onaka. Life cycle and housing adjustment as explanations of residential mobility. In Urban Studies n°20, 1983

[Claval, 1981] P. Claval. La logique des villes. Editions LITEC. Paris 1981

[Cocu et Caruso, 2002] N. Cocu, G. Caruso. Modéliser la complexité géographique. Vers une approche progressive Automates cellulaires-Systèmes Multi-Agents. Document de travail. Mai 2002. Disponible sur : http://www.geo.ucl.ac.be/IMAGES/Caruso_Cocu_WP.pdf (consulté le 16.12.2004)

[Collinot et Drogoul, 1996] A. Collinot, A. Drogoul. Application de la méthode Cassiopée à l'organisation d'une équipe de robots. In Actes des 4èmes journées francophones d'intelligence Artificielle et Systèmes Multi-Agents, 1996.

[Conte et al., 1998] R. Conte, N. Gilbert, J.S. Sichman. MAS and Social Simulation : A Suitable Commitment. MABS'98. Paris, 1998

[Cornuéjols et al., 2002] A. Cornuéjols, L. Miclet, Y. Kodratof. Apprentissage artificiel : Concepts et algorithmes. Editions Eyrolles, Paris, 2002

[Courgeau, 1984] D. Courgeau. Relations entre cycle de vie et migrations. In Population n°3, 1984

[Courgeau et Pumain, 1984] D. Courgeau, D. Pumain. Baisse de la mobilité résidentielle. In Population et société n°179, 1984

[Courgeau, 1988] D. Courgeau. Méthodes de mesures de la mobilité spatiale. INED, Paris, 1988

[Cribier, 1989] F. Cribier. Itinéraires résidentiels et stratégies d'une génération de parisiens à deux périodes de leur vie. In Les Annales de la Recherche Urbaine n°41, 1989

[Daguet, 1996] F. Daguet. Mariage, divorce et union libre, Insee première n°482, 1996.

- [Dauce, 2002] E. Dauce. Systèmes dynamiques pour les sciences cognitives. In Approche dynamique de cognition artificielle. Editions Hermès. Paris, 2002
- [Derycke et al., 1996] P-H. Derycke, J-M. Hurriot, D. Pumain. Penser la ville. Théories et modèles. Collections VILLE, Paris, 1996.
- [DI Meo, 1999] G. DI Meo. Géographies tranquilles du quotidien. Une analyse de la contribution des sciences sociales et de la géographie à l'étude des pratiques spatiales. In Les cahiers de géographie du Québec, vol 43 n° 118. Québec 1999
- [Donikian, 2004] S. Donikian. Modélisation, contrôle et animation d'agents virtuels évoluant dans des environnements informés et structurés. HDR de l'Université de Rennes1. URL : <http://www.irisa.fr/bibli/publi/habilitations/donikian/hdr.html> (consulté le 13.03.2007)
- [Doran, 2001] J. Doran. Agent-Based Modelling of EcoSystems for Suitable Resource Management. 3rd EASSS'01. Prague, 2001
- [Droesbeke et al., 2002] J-J, J. Fine, G. Saporta. Méthodes bayésiennes en statistique. Editions TECHNIP, Paris, 2002
- [Drogoul, 1993] A. Drogoul. De la simulation multi-agent à la résolution collective de problèmes. Thèse de l'université Paris VI. Paris, novembre 1993
- [Drogoul et al., 2004] A. Drogoul, N. Ferrand, J-P. Muller. Emergence : l'articulation du local au global. In Systèmes Multi-Agents. Editions TEC&DOC. Paris, 2004
- [Dubos-Paillard et al., 2003] E. Dubos-Paillard, Y. Guermond, P. Langlois. Analyse de l'évolution par automate cellulaire. Le modèle SpaCelle. In L'espace géographique n°4, 2003
- [Duchène et Cambier, 2003] C. Duchène, C. Cambier. Généralisation cartographique avec des agents qui voient et communiquent. In Journées Francophones sur les Systèmes-Multi-Agents (JFSMA'03). Hammamet, Tunisie, novembre 2003
- [Duchène, 2003] C. Duchène. Coordination multi-agents pour la généralisation automatique. In Bulletin d'Information de l'IGN, n° 74, mars 2003
- [Dupuy, 1992] J.P Dupuy. Introduction aux sciences sociales : logique des phénomènes collectifs. Editions, Ellipses, Paris, 1992
- [Dupuis, 2002] J. Dupuis. Estimation Bayésienne d'un modèle multi-état markovien. In Méthodes bayésiennes en statistique. Editions TECHNIP, Paris, 2002
- [Durand-Dastès, 2001] F. Durand-Dastès. Les concepts de la modélisation en analyse spatiale. In Modèles en analyse spatiale. Editions Hermès. Paris 2001
- [Durand-Dastès, 1984] F. Durand-Dastès. Systèmes et localisations : problèmes théoriques et formels. Colloque Géopoint Avignon. Groupe dupont 1984
- [Dureau et al., 2000] F. Dureau et alii. Métropoles en mouvement. Une comparaison internationale, Paris 2000.
- [Edmonds, 2003] B. Edmonds. Simulation and Complexity – how they can relate ? In Virtual World of Precision, 2003
- [Engelen, et al., 1995] G. Engelen, R. White, I. Uljee, P. Drazan. Using Cellular Automata for

Integrated Modelling of Socio-environmental Systems. In Environmental Monitoring and Assessment n°34, 1995

[Fates, 2001] N. Fates. Les automates cellulaires : vers une nouvelle épistémologie ?. Mémoire de DEA. Paris-I, 2001. Disponible sur <http://nazim.fates.free.fr/Epistemo/Epistemo.html> (consulté le 07.09.2006)

[Ferber, 1989] J. Ferber. Objets et agents : une étude des structures de représentation et de communication en IA. Thèse d'Etat, Université de Paris VI, juin 1989

[Ferber, 1995] J. Ferber Les Systèmes multi-agents. Vers une intelligence collective. IIA. InterEditions, Paris, 1995

[Filippi, 1993] B. Filippi. Les enquêtes-mobilité : potentialités et enjeux pour la connaissance du fonctionnement des marchés locaux de l'habitat. In Actes et entretiens de l'Habitat de Nancy, 1993

[Filippi, 1997] B. Filippi. Mobilité résidentielle, chaînes de vacance et approches systémiques des marchés locaux de l'habitat. Comment observer et modéliser ? In Comprendre les marchés locaux du logement. Edition L'Harmattan, Collections Villes et entreprises, Paris, 1997

[Fleury et al., 2007] G. Fleury, P. Lacomme, A. Tanguy. Simulation à événements discrets. Modèles déterministes et stochastiques. Exemples d'applications implémentés en Delphi et en C++. Editions Eyrolles, Paris 2007

[Folley, 2002] D. Folley. The strange history of the economic agent. Working paper of the Graduate Faculty of New School University, 2002

[Forrester, 1969] J.W. Forrester. Urban Dynamics. MIP Press. Cambridge 1969

[Frankhauser, 1991] P. Frankhauser. Beschreibung der Evolution urbaner Systeme mit der Mastergleichung. Thèse de doctorat de l'Université de Stuttgart, 1991.

[Frankhauser et Pumain, 2001] P. Frankhauser, D. Pumain. Fractales et géographie. In Modèles en analyse spatiales. Editions Hermès. Paris 2001

[Frankhauser et al., 1998] P. Frankhauser, A. Moine, H. Bruch, C. Tannier, D. Josselin. Simulating settlement pattern dynamics by subjective attractivity evaluation of agents. Paper presented for the 37th meeting on Western Regional Science Association. Monterey, California, 1998

[Frankhauser et al., 1997] P. Frankhauser, C. Tannier, P. Gillon, D. Josselin. Simulating Urban pattern dynamics by using an alternative approach of modelization. In European Workshop on Theoretical and Quantitative Geography, Rostock, 1997

[Frankhauser et al., 1995] P. Frankhauser, MN. Mille, T. Back. Un modèle pour simuler l'impact d'un projet d'aménagement sur la dynamique urbaine. Congrès "Urban Utopia". Berlin 15-17 novembre 1995. Disponible sur : <http://thema.univ-fcomte.fr/MG/pdf/UrbanUtopia.pdf> (consulté le 14.11.2004)

[Frankhauser, 1993] P. Frankhauser. La fractalité des structures urbaines. Thèse de doctorat de l'Université Paris I, UFR de Géographie, Paris, 1993

[Frankhauser, 1996] P. Frankhauser. Echelles, hiérarchies et fait urbain. HDR de l'Université de Franche-Comté, Besançon, 1996.

- [**Garzon, 1990**] M. Garzon. Cellular automata and discrete neural networks. *Physica*, n°45, 1990
- [**Gerand, 1967**] R-H. Gerand. Les origines du logement social en France, Paris, Edition Ouvrière, 1967
- [**Gibson, 1986**] J. Gibson. The ecological approach to visual perception. NJ : Lawrence Erlbaum Associates, Inc, Hillsdale, 1986
- [**Ginsberg, 1979**] R. Ginsberg. Timing and Duration Effect in Residential History and Other Longitudinal Data. *In Regional Science and Urban Economics* n°9, 1979
- [**Girerd, 2004**] G. Girerd. Analyse du comportement pendulaire dans la perspective d'un report modal. Thèse de doctorat de géographie. Université de Franche-Comté. Besançon 2004
- [**Grimm, 1999**] V. Grimm. Ten years of individual-based modelling in ecology: what have we learned and what could be learned in the future. *In Ecological Modelling*, vol. 115, 1999
- [**Guermond, 2005**] Y. Guermond. Des modèles classiques à la modélisation incrémentale. *In Modélisations en géographie : déterminismes et complexités*. Editions Hermès. Paris 2005
- [**Guessoum, 2002**] Z. Guessoum. Modèles multi-agents et systèmes dynamiques. *In Approche dynamique de la cognition artificielle*. Editions Hermès. Paris 2002
- [**Guttorp, 1995**] P. Guttorp. Stochastic Modelling of scientific Data. Edition Chapman an Hall. London, 1995
- [**Goodman, 1990**] A.C. Goodman. Demographics of Individual Housing Demand. *In Regional Science and Urban Economics*, n°20, 1990
- [**Hägerstrand, 1970**] T. Hägerstrand. What about people in regional science? Paper of the Regional Science Association, 1970
- [**Hägerstrand, 1985**] T. Hägerstrand. Time-Geography: focus on the corporeality of man society and environment. *In The Science of Praxis of Complexity*. The United Nation University, 1985
- [**Harman, 1967**] H.H. Harman. Modern Factor Analysis. University of Chicago Press, 1967
- [**Hockney et Eastwood, 1998**] R.W. Hockney, J.W. Eastwood. Computer simulation using particles. Institute of Physics Publishing. London, 1998
- [**Holland, 1998**] J. Holland. Emergence: From chaos to order. Perseus Book. MA, 1998
- [**Houot, 1999**] H. Houot. Approche géographique des nuisances sonores urbaines. Méthodologie d'aide à la prise en compte des nuisances sonores en aménagement urbain. Application à la ville de Besançon. Thèse de doctorat de l'Université de Franche-Comté, 1999
- [**Huynh et al., 2006**] T.D. Huyng, N. Jennings, N.R. Shadbolt. Certified Reputation: How an Agent can Trust a stranger. International Joint Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS'06). ACM Press, 2006
- [**INRETS, 1989**] INRETS. Un milliard de déplacements par semaine. La mobilité des français. La documentation française. INRETS (Institut National de Recherche sur les Transports et leur Sécurité), 1989

[Jen, 1990] E. Jen. A periodicity in one-dimensional cellular automata. In *Physica D*, n°45, 1990

[Joerin, 1995] F. Joerin. Méthode multicritère d'aide à la décision et SIG pour la recherche d'un site. In *Revue internationale de géomatique*, 1995

[Kaufmann, 2000] V. Kaufmann. *Mobilité quotidienne et dynamiques urbaines. La question du report modal*, Science, Technique, Société. Presses polytechniques et universitaires romandes, 2000.

[Kaufmann et al., 2001] V. Kaufmann, C. Jemelin, J-M. Guidez. *Automobile et modes de vie urbains : quel degré de liberté ?* La Documentation Française, Paris, 2001

[Kaufmann et al., 2004] V. Kaufmann, M. Schuler, O. Crevoisier, P. Rossel. *Mobilité et motilité. De l'intention à l'action*. Cahier du LASUR n°4, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, février 2004.

[Kerjosse et Tamby, 1996] R. Kerjosse, I. Tamby. *La situation démographique en 1994, mouvement de la population*, Insee Résultats n°505-506, Paris, 1996

[Kruchten, 2000] P. Kruchten. *The Rational Unified Process – An Introduction*. 2nd edition. Addison-Wesley, 2000.

[Laaribi, 2000] A. Laaribi. *SIG et analyse multicritère*. Editions Hermès. Paris, 2000

[Lamarche, 2003] F. Lamarche. *Humanoïdes virtuels, réaction et cognition : une architecture pour leur autonomie*. Thèse de doctorat de l'Université de Rennes1, 2003.

[Lamy et al., 1999] S. Lamy, Y. Demazeau, C. Baeijs, M. Jackson, W. Mackaness, R. Weibel. *AGENT Project : Automated Generalisation New Technology*, 1999. Disponible sur <http://egent.ign.fr/public/stresa.pdf> (Consulté le 15.12.2005).

[Langlois, 2005] P. Langlois. *Complexité et systèmes spatiaux*. In *Modélisations en géographie, déterminismes et complexités*. Editions Hermès. Paris 2005

[Langlois, 2006] P. Langlois. *Approche conceptuelle de l'espace : structurations de l'espace, du temps et des objets dans un contexte de modélisation multi-agents*. in *Modélisation et simulation multi-agents : application pour les Sciences de l'Homme et de la Société*, Editions Hermes-Lavoisier, Paris 2006

[Langlois et Phipps, 1997] A. Langlois, M. Phipps. *Automates cellulaires : application à la simulation urbaine*. Editions Hermès. Paris 1997

[Larman, 2003] C. Larman. *Agile and Iterative development: A Managers Guide*. Editions Addison-Wesley, 2003.

[Lars, 1992] L. Lars. *Période post-parentale : déménager ou pas ?* In *La ville en mouvement : habitat et habitants*. Editions L'Harmattan, Paris, 1992

[Lelièvre et Lévy-Vroelant, 1992] E. Lelièvre, C. Levy-Vroelant. *La ville en mouvement : Habitat & Habitants*, Edition L'HARMATTAN, Collection villes et entreprises, 1992.

[Lefranc, 1995] C. Lefranc. *Le mariage en déclin, la vie en couple aussi*, Insee première n°392, 1995.

- [Le Gléau et al., 1996] J-P. Le Gléau, D. Pumain, T. Saint-Julien. Villes d'Europe : à chaque pays sa définition. In *Economie et statistique* n° 294-295, 1996
- [Le Jannic et Vidalenc, 1997] T. Le Jannic, J. Vidalenc. Pôles urbains et périurbanisation. Le zonage en aires urbaines. INSEE Première n° 516, 1997
- [Le Jannic, 1996] T. Le Jannic. Une nouvelle approche territoriale de la ville. In *Economie et statistique* n° 294-295, 1996
- [Le Moigne, 1977] J-L. Le Moigne. La théorie du système général. Presse universitaire française. Paris 1977
- [Levy et Piazzoni, 1994] J-P. Levy, F. Piazzoni. Qui habite quoi ? Composantes et dynamiques socio-spatiales du marché de l'habitat à Pantin. Rapport pour la ville de Pantin, 1994
- [Levy, 1995] J-P. Levy. Les dynamiques socio-spatiales des marchés immobiliers. In *Revue d'Economie Régionale et Urbaine* n°3, 1995
- [Lévy, 2000] J. Lévy. Les nouveaux espaces de la mobilité, in *Les territoires de la mobilité*, PUF, Paris 2000.
- [Lily et al., 1992] Van N. Lily, H. Pieter, D. Frans. Influence du divorce sur la trajectoire résidentielle. In *La ville en mouvement : habitat et habitants*. Editions L'Harmattan, Paris, 1992
- [Liu et Anderson, 2004] X-H. Liu, C. Anderson. Assessing the impact of temporal dynamics on land-use change 237erritori. In *computers, Environment and Urban systems* (28), 2004
- [Lord et Levy, 1994] R. Lord, P. Levy. Moving from cognition to action : A control theory perspective. In *Applied psychology : an international review* n°43, 1994
- [Louvot, 1992] C. Louvot. De la location à la propriété : le parc de logements se redistribue. In *Economie et statistique* n°251, 1992
- [Lugassy, 1985] F. Lugassy. Les significations psychosociales du logement. Thèse d'État, Université de Nancy, 1985
- [Maleyre, 1994] I. Maleyre. Logement et demande de biens à caractéristiques multiples : vers un renouvellement des modèles d'équilibre spatial urbain ? Application à Abidjan. Thèse de doctorat de sciences économiques, Université Paris XV, 1994
- [Mallot, 1997] A. Mallot. Behavior-oriented approaches to cognition : theoretical perspectives. *Theory in biosciences* n°116, 1997
- [Martouzet, 1995] D. Martouzet. Recherche du fondement de l'éthique de l'aménagement. Thèse de doctorat de géographie. Université de Tours. Tours 1995
- [Marzloff, 2005] B. Marzloff. Mobilités, trajectoires fluides. Editions CERTU, 2005.
- [Mathis, 2003] P. Mathis. Graphes et réseaux: modélisation multiniveau. Editions Hermès, Paris 2003
- [Meadows et al., 1972] H.D. Meadows, D.L. Meadows, J. Randers, W. Behrens. The limits of growth. Universe Books, 1972
- [Meyn et Tweedie, 1993] S.P. Meyn, R.L. Tweedie. Markov Chains and Stochastic Statability.

New York Spring-Verlag, 1993

[**Micoud, 1974**] A. Micoud. Le fonctionnement de la mobilité résidentielle intra-urbaine, application à l'agglomération stéphanoise, Saint-Etienne, CRESAL, 1974.

[**Morin, 1991**] E. Morin. La Méthode. Tome 4 : les idées, leur habitat, leur vie, leurs mœurs. Editions Le Seuil. Paris 1991

[**Moine, 1995**] A. Moine. Modélisation de la demande de logements en zone frontalière. Un outil d'aide à la décision appliquée au marché local de Morteau (Doubs), Thèse de doctorat de l'Université de Franche-Comté, 1995.

[**Morin, 1977**] E. Morin. La Méthode. Tome 1 : La nature de la nature. Editions Le Seuil. Paris 1977

[**Moukas et al., 1998**] A. Moukas, K. Chandrinos, P. Maes. Trafficopter : a Distributed Collection System for Traffic Information. CIA'98. Paris, 1998

[**Naïm, et al., 2004**] P. Naïm , P-H. Wuillemin , P. Leray , O. Pourret , A. Becker. Réseaux bayésiens. Editions Eyrolles, Paris, 2004

[**Newell, 1990**] A. Newell. Unified Theories of Cognition. Harvard University Press, 1990

[**Nicot, 1996**] B-H. Nicot. La périurbanisation dans les zones de peuplement industriel et urbain. In Données urbaines. Editions Antropos. Collections villes. Paris 1996

[**Nicot, 2007**] B. Nicot. Comportements spatiaux, critères de choix et imprécision. Document de travail ECDESUP, Laboratoire ThéMA, Besançon, 2007

[**Noble, 2000**] J. Noble. Basic relationships patterns. In Pattern Languages of Program Design. Editions Addison-Wesley. London, 2000

[**Offner et Pumain, 1998**] J-M. Offner, D. Pumain. Réseau et territoire, significations croisées, Editions de l'Aube, La Tour d'Aigues, 1998.

[**Openshaw, 1983**] S. Openshaw. The Modifiable Areal Unit Problem. Geobooks, Norwich, 1983

[**Orfeuil, 1999**] J-P Orfeuil. La mobilité : analyses, représentations, controverses. Université de Paris XII 1999

[**Orfeuil, 1989**] J-P Orfeuil. Un milliard de déplacements par semaine, la mobilité des Français, INRETS, La Documentation française, 1989.

[**Orfeuil, 1999**] J-P. Orfeuil. La mobilité, révélatrice du nomadisme ou de la volonté d'ancrage ? Edition CERTU, 1999

[**Orfeuil, 2000**] J-P. Orfeuil. L'évolution de la mobilité quotidienne. Comprendre les dynamiques, éclairer les controverses, Synthèse Inrets n° 37, 2000.

[**Padgham et Winikoff, 2005**] L. Padgham, M. Winikoff. Prometheus: A Practical Agent-Oriented Methodology. In Agent-oriented methodologies, Edition Idea Group Publishing, 2005

[**Palmade, 1989**] J. Palmade. Système idéologique et symbolique de l'habiter. Thèse d'État, Université de Toulouse, 1989

[Pàvon et al., 2005] J. Pàvon, J. Gomez-Sanz, R. Fuentes. The INGENIAS methodology and tools. In Agent-oriented methodologies, Edition Idea Group Publishing, 2005.

[Pearl, 1986a] J. Pearl. A constraint-propagation approach to probabilistic reasoning. In Uncertainty in Artificial Intelligence, Edition Elsevier Science, Amsterdam, 1986

[Pearl, 1986b] J. Pearl. Fusion, propagation, and structuring in belief networks. In Artificial Intelligence n°29, 1986

[Pearl, 1987a] J. Pearl. Evidential reasoning using stochastic simulation of causal models. In Artificial Intelligence n°32, 1987

[Pearl, 1987b] J. Pearl. Probabilistic reasoning in Intelligent Systems : Networks of Plausible Inference. Edition Morgan Kaufmann, San Francisco, 1988

[Petonnet, 1982] C. Petonnet. Espace habité, ethnologie des banlieues. Paris, Galilée, 1982

[Peckham et al., 1995] J. Peckham, B. Mackellar, M. Doherty. Data models for extensible support of explicit relationships in design databases. In VLDB Journal n°4, 1995

[Phipps, 1968] M. Phipps. Recherche de la structure d'un paysage local par les méthodes d'analyse multivariable. In Comptes rendus de l'Académie des Sciences de Paris, 1968

[Phipps, 1966] M. Phipps. Introduction au concept de modèle biogéographique. In Actes du 2ème Symposium International de Photo-Interprétation. Editions Technip. Paris 1966

[Phipps, 1989] M. Phipps. Dynamical Behavior of Cellular Automata under the Constraint of Neighborhood Coherence. In Geographical Analysis n°21, 1989

[Platon et al., 2005] E. Platon, N. Sabouret, S. Honiden. Overhearing and Direct Interactions : Point of View of an Active Environment, a Preliminary Study. Proceedings of AAMAS Workshop on Environment for Multi-Agent Systems (E4MAS 2005), 2005

[Portugali et Benenson, 1997] J. Portugali et I. Benenson. Human agents and global forces in a self-organising city. In Self-Organization of Complex Structures: From Individual to Collective Dynamics. London, 1997

[Portugali et Benenson, 1995] J. Portugali et I. Benenson. Artificial planning experience by means of a heuristic self-space model: simulating international migration in the urban process. In Environment and Planning B 27, 1995

[Portugali et Benenson, 1994] J. Portugali et I. Benenson. Competing order parameters in a self-organizing city. In Managing and Marketing of Urban Development and Urban Life. Berlin, 1994

[Portugali et al., 1997] J. Portugali et I. Benenson, I. Omer. Spatial cognitive dissonance and sociospatial emergence in self-organizing city. In Environment and Planning B-Planning & Design, 1997

[Portugali et al., 1994] J. Portugali et I. Benenson, I. Omer. Socio-spatial residential dynamics : stability and instability within a self-organized city. In Geographical Analysis n°26, 1994

[Portugali, 2000] J. Portugali. Self-Organization and the city. Editions Springer. Berlin 2000

[Potier, 1996] F. Potier. Le tourisme urbain : les pratiques des Français, Inrets, 1996.

[Pumain et al., 1989] D. Pumain, L. Sanders, T. Saint-Julien. Villes et auto-organisation. Editions Economica, Paris, 1989.

[Pumain et Saint-Julien, 2001] D. Pumain, T. Saint-Julien. Les interactions spatiales. Volume 2 : interactions. Editions Armand Colin. Collection Cursus. Paris, 2001

[Pumain et al., 1996] D. Pumain, P-H. Derycke J-M. Huriot. Pour une confrontation des théories urbaines. In Penser la ville. Editions Anthropos Economica. Paris 1996

[Pumain et Robic, 1996] D. Pumain, M-c. Robic. Théoriser la ville. In Penser la ville, Théories et modèles. Editions Anthropos Economica. Collection Villes. Paris 1996

[Pumain et Godard, 1996] D. Pumain, F. Godard. Données Urbaines, Vol. 1, Collection VILLES, 1996.

[Pumain et Saint-Julien, 1997] D. Pumain, T. Saint-Julien. L'analyse 240errito, Volume 1 : Localisation, A. Colin, Collection Cursus, 1997.

[Pumain et Mattei, 1998] D. Pumain, M-F. Mattei. Données Urbaines, Vol. 2, Collection VILLE, 1998.

[Pumain et Mattei, 2003] D. Pumain, M-F. Mattei. Données Urbaines, Vol. 3, Collection VILLE, 2003.

[Principia Cybernetica, 2003] Principia Cybernetica, 2003 Disponible sur : <http://pespmc1.vub.ac.be> (consulté le 12.04.2006)

[Provitolo, 2002] D. Provitolo. Risque urbain, catastrophes et villes méditerranéennes. Thèse de doctorat de l'Université de Nice Sophia-Antipolis, Nice, 2002.

[Provitolo, 2006] D. Provitolo. La dynamique des systèmes selon J. W Forrester, 2006. Disponible sur http://www.hypergeo.eu/article.php3?id_article=384 (consulté le 20.09.2007)

[Provitolo, 2007] D. Provitolo. Les différentes formes de complexité des systèmes de risque et de catastrophe. In Catastrophes, discontinuités, ruptures, limites, frontières. Comment les analyser ? comment les anticiper ? 14ème journées de Rochebrune. Rencontres interdisciplinaires sur les systèmes complexes naturels et artificiels du 21 au 27 janvier 2007, ENST, 2007.

[Racine, 1996] J-B Racine. Exurbanisation et métamorphisme péri-urbain. Introduction à l'étude de la croissance du grand Montréal. In Revue de géographie de Montréal n° 22. Montréal 1996

[Raftery et Tavaré, 1994] A. E Raftery, S. Tavaré. Estimation and Modelling Repeted Patterns in High order Markov Chain with Mixture Transition Distribution Model. In Applied Statistics, vol. 43, 1994

[Relieu et Quéré, 1998] M. Relieu, L. Quéré. Mobilité, perception et sécurité dans les espaces publicsurbains. in Les Risques urbains : Acteurs systèmes de prévention. Collection VILLES, Paris, 1990

[Remy, 2000] J. Remy. Métropolisation et diffusion de l'urbain : les ambiguïtés de la mobilité, in Les territoires de la mobilité, PUF, Paris, 2000.

[Rennard, 2002] J-P Rennard. Vie artificielle. Où la biologie rencontre l'informatique. Illustré

avec Java. Editions Vuibert. Paris 2002

[Robert, 1996] C. Robert. Methodes de Monte-Carlo par chaînes de Markov. Economica, Paris, 1996

[Robert-Bobée 2001] I. Robert-Bobée. Modelling Demographic Behaviours in the French Microsimulation Model Destinie : an Analysis of Future Change in Completed Fertility, Insee document de travail n°G2001/14

[Robert-Bobée 2002] I. Robert-Bobée. La programmation des événements démographiques dans Destinie, Insee note n°20/G211 26 juillet 2002

[Rolland-May, 2000] C. Rolland-May. Evaluation des territoires : concepts, modèles, méthodes. Editions Hermès, Paris, 2000

[Roncayolo, 1982] M. Roncayolo. La ville et ses territoires. Editions Gallimard. Paris 1982

[Royce, 1958] J. Royce. The development of factor analysis. In the Journal of General Psychology n°58. New York 1958

[Saint-Julien, 2001] T. Saint-Julien. Processus de diffusion spatiale et modélisation du changement in Modèles en analyse spatiale ; Edition Hermès, Paris, 2001.

[Salomon et al., 1993] I. Salomon, P. Bovy, J-P. Orfeuill. A Billion Trips a Day, Dordrecht, Kluwer Academic Publishers, 1993.

[Sanders, 1990] L. Sanders. L'analyse statistique des données en géographie, Montpellier : Alidade Reclus, 1990.

[Sanders, 2006] L. Sanders. Les modèles agents en géographie urbaine. In Modélisation et simulation multi-agents : applications pour les sciences de l'Homme et de la Société. Edition Hermès-Lavoisier, Paris, 2006.

[Saporta, 2006] G. Saporta. Probabilité, analyse des données et statistique. Estimation, Monte-Carlo, Régression, Tests, Vraisemblance. Editions TECHNIP, Paris, 2006

[Sardon, 1996] J-P. Sardon. L'évolution du divorce en France. In Population, n°3, 1996

[Schelling, 1978] T.C. Schelling. Micromotives and Macrobehavior. Editions WW Norton and Company. New York, 1978

[Schelling, 1974] T.C. Schelling. On the ecology of micro-motives. In the corporate society. Editions R. Marris. London 1974

[Schelling, 1971] T.C. Schelling. Dynamic models of segregation. In Journal of Mathematical Sociology (1) 1971

[Schelling, 1969] T.C. Schelling. Models of segregation. In American Economic Review (59) 1969

[Schuler et al., 1997] M. Schuler, B. Lepori, V. Kaufmann, D. Joye. Eine Integrative Sicht des Mobilität. in Hinblick auf ein neues Paradigma des Mobilitätsforschung, Bern Schweizerischer Wissenschaftsrat, 1997.

[Servat, 2000] D. Servat. Distribution du contrôle de l'action et de l'espace dans les simulations multi-agents de processus physiques. In JFIADSMA'2000. Editions Hèrmes, Paris, 2000

- [Skoda, 1971] J.M. Skoda. The checkerboard model of social interaction. In Journal of Mathematical Sociology (1) 1971
- [Soulignac, 1995] F. Soulignac. Construction neuve et déménagements en chaîne, Paris, IAURIF, 1995
- [Sperman, 1904] C. Sperman. General intelligence objectively determined and measured. In Journal of Psychology n°15. New York 1904
- [Stauffer, 2001] D. Stauffer. Monte Carlo simulation of Snajd models. In Journal of Artificial Societies and Social simulation. 2001. Disponible sur : <http://www.soc.survey.ac.uk/JASSS/5/1/4.html> (consulté le 15.03.2006)
- [Taffin, 1987] C. Taffin. La mobilité résidentielle entre 1979 et 1984, Données sociales, vol. 5, Urbanisation et usages de l'espace, INSEE, 1987.
- [Tannier, 2000] C. Tannier. Les localisations commerciales de détail en milieu urbain, mieux connaitre par la modélisation pour mieux aménager: réalisation d'un modèle d'évaluation de l'attractivité des agrégats commerciaux d'une ville pour différents types d'établissements commerciaux de détail. Thèse de doctorat de l'Université de Franche-Comté, Besançon, 2000.
- [Tannier et Houot, 2003] C. Tannier, H. Houot. SimNoise: Simulating the Impact of Noise Annoyance on Intra-urban Residential Migration. ThéMA, Université de Franche-Comté, Besançon 2003
- [Tannier et al., 2006] C. Tannier, P. Frankhauser, H. Houot, G. Vuidel. Optimisation de l'accessibilité aux aménités urbaines et rurales à travers le développement de modèles fractals d'urbanisation. XLII ° Colloque de l'ASRDLF – XII° Colloque du GRERBAM, Sfax, 4-6 Septembre 2006
- [ThéMA, 2005] E. Dubos-Paillard, P. Frankhauser, A. Moine, S. Ormaux, P. Signoret, C. Tannier. Schéma de Cohérence Territoriale (SCOT). Livre Blanc. Laboratoire ThéMA, UMR, 6049, CNRS, Université de Franche-Comté. Besançon, 2005.
- [Thériault, 2005] M. Thériault. Définition et mesure de l'accessibilité aux services urbains: comportements de mobilité, perceptions et impact sur les valeurs résidentielles. Présentation ThéoQuant, Université de Franche-Comté, Besançon, 26 janvier 2005
- [Thomas, 2005] R. Thomas. Modèle de mémoire et de carte cognitive spatiales : application à la navigation du piéton en environnement urbain. Thèse de doctorat de l'Université de Rennes1, 2005
- [Thumerelle, 1986] J-P. Thumerelle. Peoples en mouvement. La mobilité spatiale des populations. Paris, SEDES, 1986.
- [Tobler, 1979] W. Tobler. Cellular geography. In Philosophy in geography. Reidel Pub, Dordrecht, Holland, 1979
- [Toulemon, 1996] L. Toulemon. La cohabitation hors mariage s'installe dans la durée. In Population n°3, mai-juin 1996
- [Treuil et al., 2001] J-P Treuil, C. Mullon, E. Perrier, M. Piron. Simulations multi-agents de dynamiques spatialisées. In Modèles en analyse spatiale. Editions Hermès. Paris 2001

[**Tucker, 1963**] L. R. Tucker. Implications of Factor Analysis of Tree-Way Matrices for Measurement of Change. In *Problem in Measuring Change*. Editions CW. Harris. University of Wisconsin Press, 1963

[**Turing, 1952**] A.M. Turing. The chemical basis for morphogenesis. In *Philosophical Transactions of the Royal society of London*. London 1952

[**Urry, 1990**] J. Urry. *The Tourist Gaze*, Editions Sage, London, 1990.

[**Urry, 2000**] J. Urry. *Sociology beyond Societies, Mobilities for the Twenty First Century*, Edition Routledge, London, 2000

[**Vallin et Meslé, 2002**] J. Vallin, F. Meslé. *Tables de mortalité françaises pour les XIXe et XXe siècles et projections pour le XXIe siècle*. Editions PUF, Paris, 2002

[**Vanbergue, 2003**] D. Vanbergue. *Conception de simulation multi-agents. Application à la simulation des migrations intra-urbaines de la ville de Bogota*. Thèse de doctorat d'informatique. Université de Paris 6. Paris 2003

[**Vanbergue et Drogoul, 2002**] D. Vanbergue, A. Drogoul. *Approche multi-agent pour la simulation urbaine*. In *Actes des journées Cassini*, Brest, septembre 2002

[**Vandekerckove, 1995**] L. Vandekerckove. *Dépenses de logement et comportements résidentiels en 1988 et 1992*. In *Consommation et modes de vie n°77-78*, INSEE, Paris, 1995

[**Van Imhoff et Post, 1988**] E. Van Imhoff, W. Post. *Méthodes de micro-simulations pour les projections de population*. In *Population*, n°4, 1988

[**Vidberg et Tannier, 1999**] S. Vidberg, C. Tannier. *Urban location strategies. Some elements for a best understanding*. Working paper, Université de Franche-Comté, Théma, 1999.

[**Villeneuve-Gokalp, 1994**] C. Villeneuve-Gokalp. *Constance et inconstances de la famille*, Travaux et Documents de l'Ined, 1994

[**Vincent, 1986**] M. Vincent. *La formation du prix du logement*. Editions Economica, Paris, 1986

[**Wachter et al., 2005**] S. Wachter, J. Theys, Y. Crozet, J-P. Orfeuil. *La mobilité urbaine en débat. Cinq scénarios pour le futur ?* Editions Drast-Certu. Collection Transport et mobilité n° 46. 2005

[**Walliser, 1977**] B. Walliser. *Systèmes et modèles. Introduction critique à l'analyse de systèmes*. Essai, éditions du Seuil, Paris, 1977.

[**Weber, 1999**] C. Weber. *Modélisation dynamique des interactions entre forme de mobilité et recomposition territoriale*. Rapport du PSIG, 1999

[**Weidlich et Haag, 1988**] W. Weidlich, G. Haag. *Interregional Migration. Dynamic Theory and Comparative Analysis*; Springer Verlag, Berlin, 1988.

[**Weidlich, 1991**] W. Weidlich. *Physics, synergetics and social science-the approach of synergetics*. *Physic reports*, vol. 204, n° 1, 1991.

[**Winder, 1999**] N. Winder. *Modéliser dans un cadre thermodynamique : une réaction à l'article de Sanders, 1999*. Disponible sur <http://www.cybergeo.eu/index2289.html> (Consulté le

12.07.2006).

[Whitelegg, 1997] J. Whitelegg. Critical Mass, Edition Pluto, London, 1997.

[White et Engelen, 2000] R. White et G. Engelen. High-resolution integrated modelling of the spatial dynamics of urban and regional systems. In Computers, Environment and Urban Systems n°24, 2000

[White et Engelen, 1997] R. White et G. Engelen. Cellular automata as the basis of integrated dynamic regional modelling. In Environment and Planning B-Planning & Design, 1997

[White et Engelen, 1994] R. White et G. Engelen. Urban Systems Dynamics and Cellular-Automata—Fractal Structures between Order and Chaos. In Chaos Solitons & Fractal n°4, 1994

[White et Engelen, 1993] R. White et G. Engelen. Cellular automata and fractal urban form: a cellular modelling approach to the evolution of urban land-use patterns. In Environment and Planning A n°25, 1993

[Wiel, 1999] M. Wiel. La transition urbaine, Edition Sprimont, Mardaga, 1999.

[Xie, 1994] Y. Xie. Analytical Models and Algorithms for Cellular Urban dynamics. Thèse de doctorat de State University of New York at Buffalo. Buffalo, 1994

[Zambonelli et al., 2005] F. Zambonelli, N. Jennings, M. Wooldridge. Multi-Agents Systems as Computational Organizations: The Gaia Methodology. In Agent-oriented methodologies, Edition Idea Group Publishing, 2005.

Table des matières

Remerciements.....	5
Avant-propos.....	7
Sommaire.....	11
Introduction.....	13
Partie I : De la mobilité à la modélisation des dynamiques urbaines	19
Chapitre 1. La mobilité : quelle place dans l'analyse des dynamiques socio-spatiales ?.....	21
1.1. La mobilité : une notion transdisciplinaire à dominance spatiale	23
1.1.1. Le caractère polysémique de la notion de mobilité.....	23
1.1.2. De la contiguïté à la connexité spatiale de la mobilité.....	24
1.1.3. De l'irréversibilité à la réversibilité de la mobilité.....	25
1.2. Retour sur les différentes formes de la mobilité.....	27
1.2.1. Une présentation synoptique des différentes formes de mobilité.....	28
1.2.2. La mobilité quotidienne.....	29
1.2.3. La mobilité résidentielle.....	31
1.3. Mobilité et politiques territoriales.....	32
1.3.1. Liens entre dynamiques territoriales et mobilités.....	32
1.3.2. De la prise en compte de la mobilité dans les politiques d'aménagements urbains et régionaux.....	34
1.3.3. Du POS à la loi SRU.....	35
1.4. La mobilité comme moteur de la dynamique urbaine.....	37
1.4.1. La mobilité résidentielle vue comme productrice de territoire.....	38
1.4.2. La dynamique résidentielle dans le SCoT de la CAGB : un cas d'école.....	39
Bibliographie référencée.....	44
Chapitre 2. La mobilité résidentielle : mesure, dynamiques et déterminants....	47
2.1. Mesures et évolution des connaissances sur la mobilité résidentielle.....	49
2.1.1. Les sources de données pour mesurer la mobilité résidentielle.....	49
2.1.1.1. <i>Le recensement et ses limites</i>	49
2.1.1.2. <i>Les enquêtes-Logement</i>	50
2.1.1.3. <i>Les fichiers de logement communal</i>	51
2.1.2. Les différents angles d'analyse de la mobilité résidentielle.....	52
2.1.2.1. <i>Mobilité résidentielle et comportement économique</i>	53
2.1.2.2. <i>Articulation entre carrière professionnelle, cycle de vie et mobilité résidentielle</i>	54
2.1.2.3. <i>Statut social et mobilité résidentielle</i>	54
2.1.2.4. <i>Impact de l'offre de logement sur la mobilité</i>	55
2.2. Les dynamiques habitat-habitants.....	56
2.2.1. Les dynamiques structurelles.....	57
2.2.2. Les effets de contexte.....	58
2.2.3. Les dynamiques temporelles.....	59
2.3. Les déterminants de la mobilité résidentielle.....	61

2.3.1. Les éléments de caractérisation des ménages.....	62
2.3.1.1. <i>Le statut d'occupation</i>	62
2.3.1.2. <i>La catégorie socioprofessionnelle, un indicateur illusoire du revenu et du niveau d'études</i>	65
2.3.1.3. <i>Le cycle de vie</i>	67
2.3.1.4. <i>Les réseaux de relations socioculturelles et familiales</i>	69
2.3.2. Les déterminants relatifs au logement.....	70
2.3.2.1. <i>Le type d'habitat</i>	71
2.3.2.2. <i>L'environnement résidentiel</i>	73
Bibliographie référencée.....	75

Chapitre 3. Problématiques et premières approches de modélisations et de simulations urbaines.....	79
3.1. Problématiques liées à la modélisation des dynamiques urbaines.....	80
3.2. La ville et son fonctionnement.....	82
3.2.1. Eléments de définition de la ville.....	83
3.2.2. Souscrire à une vision de la ville.....	84
3.2.3. Un nouveau découpage statistique pour cerner la ville.....	85
3.2.4. Les structures urbaines dominantes.....	87
3.3. Approche systémique de la ville.....	89
3.3.1. Définition d'un système fermé.....	90
3.3.2. Définition d'un système ouvert.....	91
3.3.3. Conception systémique de la ville.....	91
3.4. Appréhender la ville comme un système complexe.....	93
3.4.1. La complexité, une notion polysémique.....	94
3.4.2. De la complexité du système urbain.....	94
3.4.3. ... à l'émergence urbaine.....	95
3.5. Des approches classiques de modélisation à la géosimulation urbaine.....	97
3.5.1. Les approches statiques.....	97
3.5.2. Les approches dynamiques.....	98
3.5.3. Introduction à la géosimulation.....	99
3.5.3.1. <i>Définition de la géosimulation</i>	100
3.5.3.2. <i>Caractéristiques des modèles de géosimulation</i>	101
Bibliographie référencée.....	106

Partie 2 : Appropriation conceptuelle et méthodologique des outils de la géosimulation..... 113

Chapitre 4. L'approche multi-agents en géographie.....	115
4.1. Quelques généralités sur le paradigme multi agents.....	117
4.1.1. L'intelligibilité.....	117
4.1.2. L'autonomie.....	118
4.1.3. Le parallélisme.....	119
4.1.4. La situation dans un environnement.....	120
4.1.5. Les interactions.....	121
4.1.6. L'émergence.....	122

4.2. Le concept d'agent.....	123
4.2.1. Définition.....	123
4.2.2. Agents réactifs et agents cognitifs.....	124
4.2.3. L'anthropomorphisme des agents.....	126
4.3. Système multi agents versus simulation multi agents.....	127
4.3.1. Définition d'un système multi agents.....	127
4.3.2. Simulation multi agents.....	129
4.4. Méthodologie orientée agent en géographie.....	130
4.4.1. Analyse structurelle et dimensionnelle.....	132
4.4.2. Identification et spécification des agents.....	132
4.4.3. Conception architecturale.....	134
4.5. Quelques applications géographiques des SMA.....	135
4.5.1. SVERIGE : un modèle de simulation de biographies individuelles.....	136
4.5.2. MICDYN : un modèle de simulation de dynamiques spatiales de populations	136
4.5.3. SIMPOP : un modèle de simulation de l'évolution d'un système de villes.....	137
4.5.4. AGENT : un modèle de généralisation cartographique.....	138
Bibliographie référencée.....	141
Chapitre 5. Les automates cellulaires comme support spatial à la dynamique urbaine.....	143
5.1. Introduction aux automates.....	144
5.1.1. Définition intuitive d'un automate.....	144
5.1.2. Définition formelle d'un automate fini.....	144
5.2. Réseaux d'automates et automate cellulaire.....	145
5.2.1. Du réseau d'automates.....	146
5.2.2. ... à l'automate cellulaire bidimensionnel.....	146
5.3. Modélisation par automates cellulaires en géographie.....	147
5.3.1. Quelques travaux précurseurs.....	147
5.3.2. Principes de modélisation.....	148
5.3.2.1. <i>L'espace cellulaire</i>	149
5.3.2.2. <i>Les états</i>	149
5.3.2.3. <i>Le voisinage</i>	149
5.3.2.4. <i>La configuration initiale</i>	150
5.3.2.5. <i>Les règles de transition</i>	150
5.3.2.6. <i>Les modes de transition</i>	151
5.3.2.7. <i>La procédure générale</i>	151
5.3.3. De la prise en compte de l'aléatoire : les processus de Markov.....	153
5.3.4. Articulation entre automate cellulaire et système multi agents.....	153
5.4. Quelques exemples d'applications géographiques des automates cellulaires....	155
5.4.1. Le modèle de Batty et Xie.....	156
5.4.2. Le modèle de Portugali et Benenson.....	156
5.4.3. Le modèle de White et Engelen.....	158
5.4.4. Le modèle SpaCelle.....	161
Bibliographie référencée.....	164

Partie 3 : Réalisation et application d'un modèle de simulation de la dynamique urbaine : *VisualSimores*..... 167

Chapitre 6. Modélisation du comportement des agents et de la dynamique résidentielle..... 169

6.1. Considérations théoriques relatives aux réseaux bayésiens.....	171
6.1.1. Les graphes orientés sans cycle.....	172
6.1.1.1. <i>Notion de graphe</i>	172
6.1.1.2. <i>Notion d'arc</i>	173
6.1.1.3. <i>Les graphes orientés et quelques notions connexes</i>	173
6.1.2. Les probabilités.....	174
6.1.2.1. <i>Notions de probabilité et de variable aléatoire</i>	174
6.1.2.2. <i>Notions de probabilité jointe et de probabilité marginale</i>	175
6.1.2.3. <i>De la probabilité conditionnelle au théorème de Bayes</i>	176
6.2. Formalisation du modèle comportemental des agents.....	178
6.2.1. Revisite du système résidentiel.....	178
6.2.2. L'inférence comportementale des agents.....	179
6.2.2.1. <i>Spécification du graphe causal</i>	179
6.2.2.2. <i>Spécification du schéma d'inférence</i>	180
6.2.2.3. <i>Quantification des probabilités conditionnelles</i>	181
6.3. Formalisation de la dynamique spatiale de l'habitat.....	181
6.3.1. Spécification partielles de l'automate cellulaire.....	182
6.3.1. Construction de la matrice de transition.....	185
6.4. Modèle algorithmique du système résidentiel : couplage SMA-AC.....	188
6.4.1. Comment modéliser le comportement humain ?.....	188
6.4.2. Revisite de l'architecture d'agent cognitif de type BDI.....	189
6.4.3. Le choix d'un nouveau lieu de résidence et la décision de migrer.....	191
6.4.4. Formalisation mathématique de la dynamique globale du système.....	192
6.4.4.1. <i>La formation de nouveaux ménages : union ou éclatement d'un ménage existant</i>	193
6.4.4.2. <i>La disparition d'un ménage</i>	195
6.4.4.3. <i>Mathématisation de la dynamique du système résidentiel</i>	195
Bibliographie référencée.....	200

Chapitre 7. Résultats de l'application du modèle de simulation..... 203

7.1. Présentation succincte du prototype <i>VisualSimores</i>.....	204
7.2. Le terrain d'application : la commune de Saône.....	206
7.3. Description des données de calibrage du modèle de simulation.....	208
7.4. Analyse des résultats.....	210
7.4.1. Scénario 1 : un cadre de vie agréable pour tous et un équilibre Sociodémographique.....	212
7.4.2. Scénario 2 : un cadre de vie de qualité moyenne pour tous et une moins bonne entente dans les familles.....	214
7.4.3. Scénario 3 : un cadre de vie agréable pour les propriétaires et de qualité moyenne pour les locataires et une bonne entente dans les familles.....	217
7.4.4. Synthèse.....	218

Bibliographie référencée.....	222
Conclusion.....	223
Bibliographie générale	229
Table des matières.....	245
Annexes	251
Table des tableaux.....	265
Table des figures.....	267

ANNEXES

Dans ces annexes,

Annexe 1 : Démonstration du théorème de Bayes

Annexe 2 : Diagrammes de packages et classes de *VisualSimores*

ANNEXE 1

Démonstration de la formule de Bayes

La notion de probabilité conditionnelle permet de tenir compte dans une prévision d'une information complémentaire. Par exemple, si je tire au hasard une carte d'un jeu de 32 cartes, j'estime naturellement à une chance sur quatre la probabilité d'obtenir un cœur ; mais si j'aperçois un reflet rouge sur la table, je corrige mon estimation à une chance sur deux. Cette seconde estimation correspond à la probabilité d'obtenir un cœur sachant que la carte est rouge. Elle est conditionnée par la couleur de la carte ; donc, conditionnelle.

En théorie des probabilités, la probabilité conditionnelle d'un évènement A, sachant qu'un autre évènement B de probabilité non nulle s'est réalisé (ou probabilité de A, sachant B) est le nombre noté $P(A|B)$ défini par :

$$P(A|B) = \frac{P(A \cap B)}{P(B)}$$

Le réel $P(A|B)$ se lit « probabilité de A, sachant B ». $P(A|B)$ se note aussi $P_B(A)$.

Mathématiquement, soit un espace probabilisé (Ω, β, P) et B un évènement de la tribu β de probabilité non nulle (non quasi-impossible). À tout évènement A de β , on associe le nombre noté $P(A|B)$. Formellement, l'application P définie par $A \rightarrow P_B(A)$ est une probabilité.

Pour aboutir au théorème de Bayes, on part d'une des définitions de la probabilité conditionnelle. En notant $P(A \cap B)$ la probabilité que A et B aient tous deux lieu, on a :

$$P(A \cap B) = P(A|B) * P(B)$$

De même,

$$P(B \cap A) = P(B|A) * P(A)$$

Le résultat de $P(A \cap B)$ est le même que celui de $P(B \cap A)$. Il vient que :

$$P(A \cap B) = P(A|B) * P(B) = P(B|A) * P(A)$$

En divisant de part et d'autre par $P(B)$ l'équation $P(A|B) * P(B) = P(B|A) * P(A)$, on obtient la règle de Bayes :

$$P(A|B) = \frac{P(B|A) * P(A)}{P(B)}$$

Chaque terme du théorème de Bayes a une dénomination usuelle.

Le terme $P(A)$ est la probabilité *a priori* de A. Elle est « antérieure » au sens qu'elle précède toute information sur B. $P(A)$ est aussi appelée la probabilité marginale de A. Le terme $P(A|B)$ est appelée la probabilité *a posteriori* de A sachant B (ou encore de A sous condition B). Elle est « postérieure », au sens qu'elle dépend directement de B. Le terme $P(B|A)$, pour un B connu, est appelée la fonction de vraisemblance de A. De même, le terme $P(B)$ est appelé la probabilité marginale ou *a priori* de B.

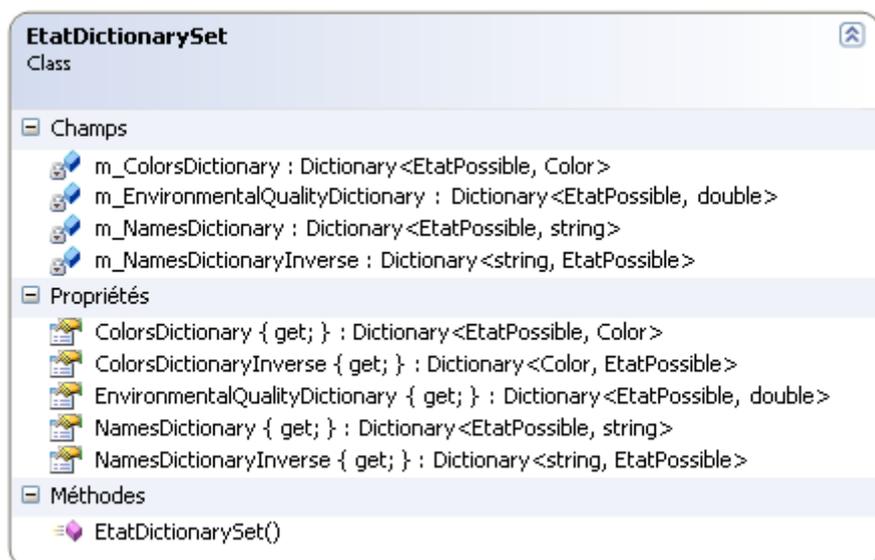
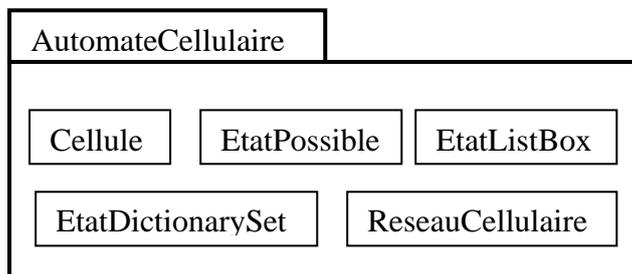
ANNEXE 2

Diagrammes de packages et classes de *VisualSimores*

L'architecture informatique du prototype *VisualSimores* est composée de deux packages principaux (la librairie de l'automate cellulaire et celle du système multi-agents) et d'un troisième dont les classes modélisent l'interface utilisateur.

Nous présentons dans cette annexe le diagramme de chacun de ces packages ainsi que l'interface logicielle de chacune des classes, structures ou énumération qu'ils contiennent.

La librairie de l'automate cellulaire et la vue statique de ses classes



Cellule
Sealed Class
→ UserControl

Champs

- m_EnvironmentaQuality : double
- m_Etat : EtatPossible
- m_SpatialResolution : int
- m_Topology : Point
- m_Voisins : List<Cellule>

Propriétés

- EnvironmentalQuality { get; set; } : double
- Etat { get; set; } : EtatPossible
- IsConstructible { get; } : bool
- IsDynamic { get; } : bool
- IsToSimulate { get; } : bool
- NameOfOccupationDuSol { get; set; } : string
- SpatialResolution { get; } : int
- Topology { get; } : Point
- Voisins { get; } : List<Cellule>

Méthodes

- Cellule(int ptX, int ptY, int spatialRes)
- ChangeToAppartementAchete(Dictionary<EtatPossible, Color> clrDico) : void
- ChangeToAppartementLoue(Dictionary<EtatPossible, Color> clrDico) : void
- ChangeToMaisonAchete(Dictionary<EtatPossible, Color> clrDico) : void
- ChangeToMaisonLouee(Dictionary<EtatPossible, Color> clrDico) : void
- EstUnAppartement(Cellule cel) : bool
- EstUnAppartementEnLocation(Cellule cel) : bool
- EstUnAppartementEnPropriete(Cellule cel) : bool
- EstUneMaison(Cellule cel) : bool
- EstUneMaisonEnLocation(Cellule cel) : bool
- EstUneMaisonEnPropriete(Cellule cel) : bool
- EstUnLogement(Cellule cel) : bool
- GetEtatDominantDuVoisinage() : EtatPossible
- IsSimulable(Cellule cell) : bool
- PotentialOfAttraction(int dureeDeSim) : double
- PredicatCelluleDynamique(Cellule cell) : bool
- PredicatCelluleVisible(Cellule cell) : bool

EtatListBox
Class
→ Form

Champs

- list : ListBox

Propriétés

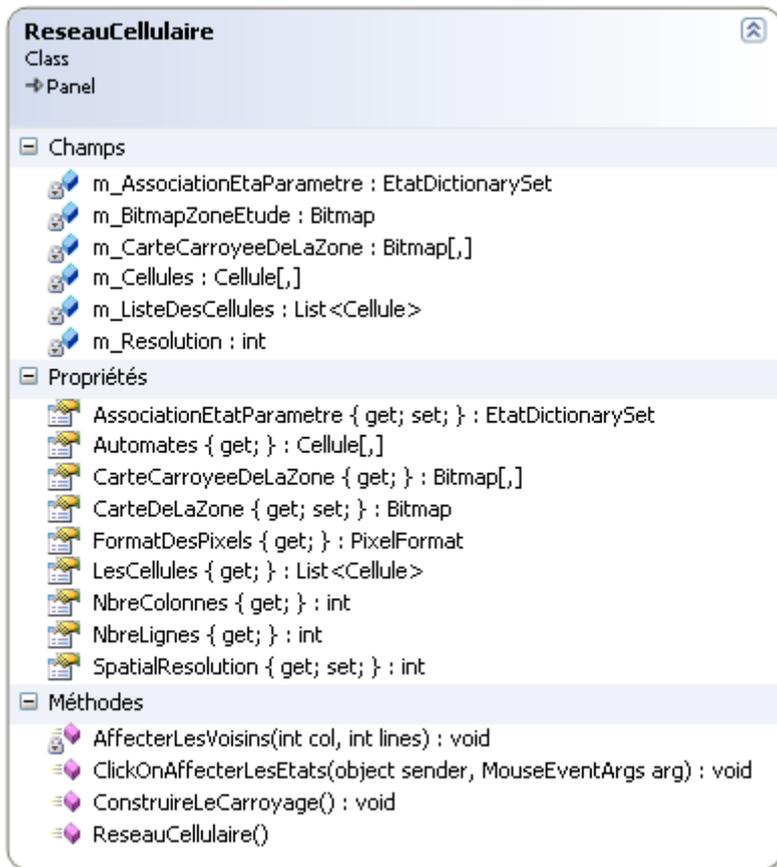
- ListeDeChoix { get; } : ListBox
- TexteDeEtatChoisi { get; } : string

Méthodes

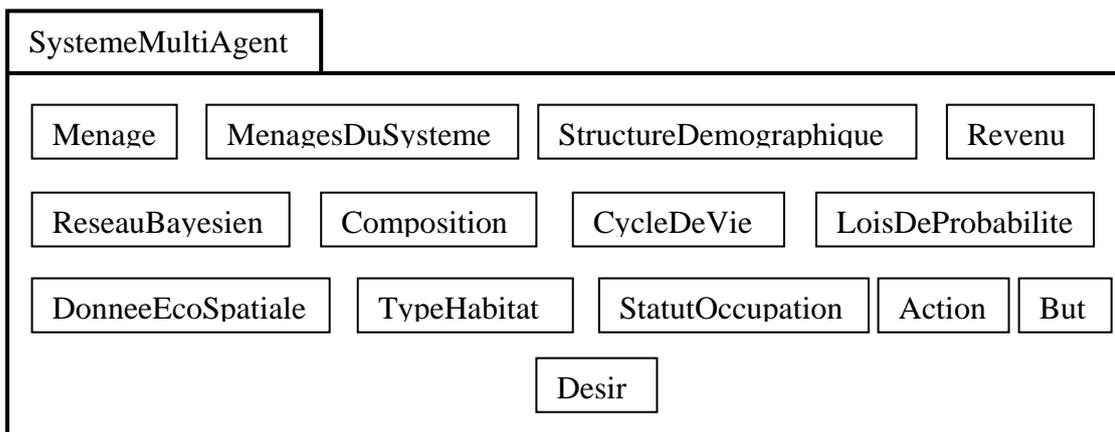
- EtatListBox()

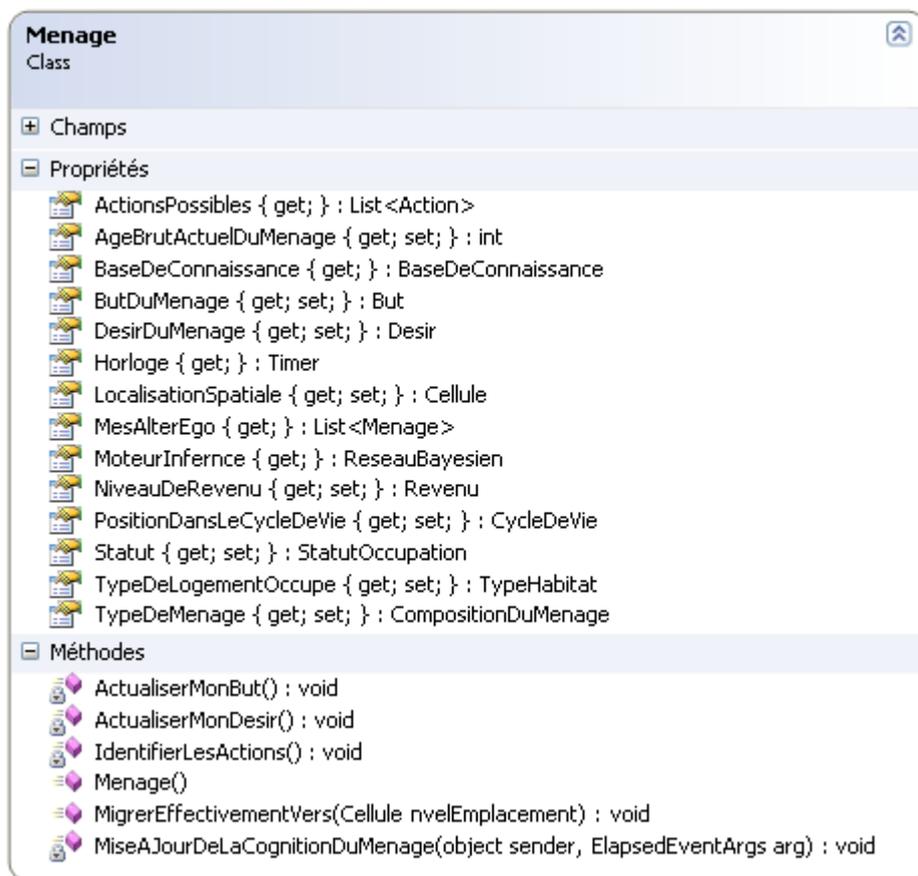
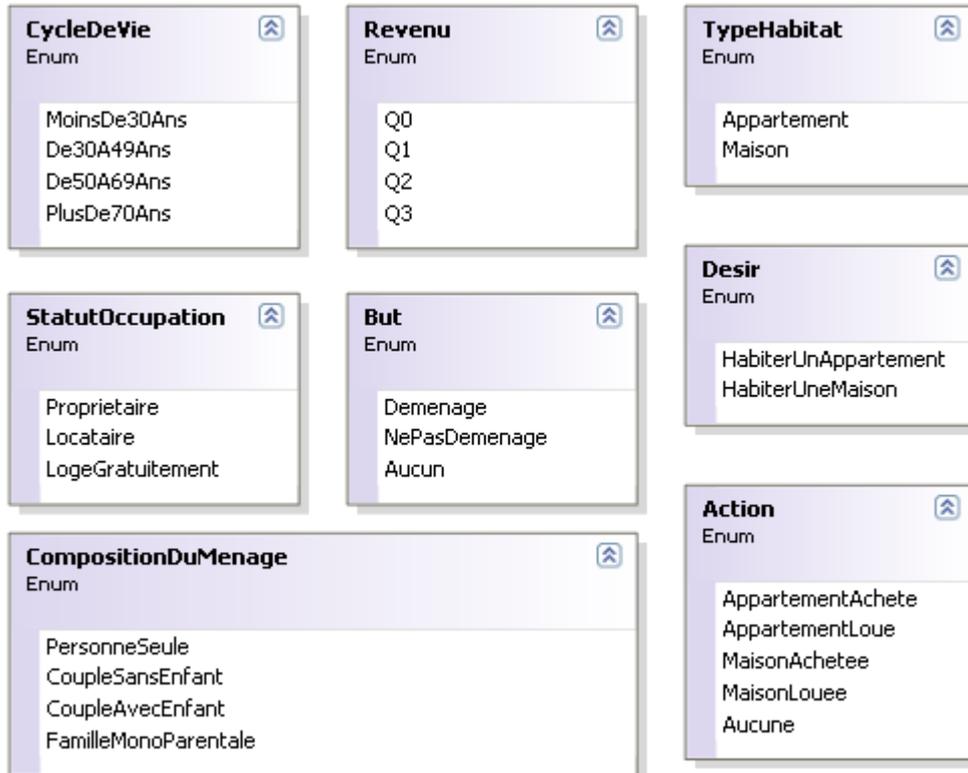
EtatPossible
Enum

- Eau
- Commerce
- Equipement
- EspaceVert
- Reseau
- ZoneConstructible
- AppartementLoue
- AppartementAchete
- MaisonLouee
- MaisonAchete



La librairie du SMA et la vue statique de ses classes





MenagesDuSysteme

Class

+ Champs

- Propriétés

-  CouplesAvecEnfant { get; } : List<Menage>
-  CouplesSansEnfant { get; } : List<Menage>
-  DonneesDemographiques { get; } : StructureDemographique
-  DonneesEcoSpatiales { get; } : DonneeEcoSpatiale
-  EffectifCouplesAvecEnfant { get; set; } : int
-  EffectifCouplesSansEnfant { get; set; } : int
-  EffectifFamilleMonoParentale { get; set; } : int
-  EffectifPersonnesSeules { get; set; } : int
-  EnsembleDesMenages { get; } : List<Menage>
-  FamillesMonoParentales { get; } : List<Menage>
-  Horloge { get; } : Timer
-  PersonnesSeules { get; } : List<Menage>
-  TauxDeDecohabitation { get; } : double
-  TauxDeDissolutionDesCouples { get; } : double
-  TauxUnion { get; } : double

- Méthodes

-  MenagesDuSysteme(StructureDemographique structDemo, DonneeEcoSpatiale donneeEcoSpatiale)
-  MiseAJourDynamiqueDesEffectifs() : void
-  OnActualisationDesEffectifs(object sender, ElapsedEventArgs arg) : void

LoisDeProbabilite

Class

- Champs

-  m_LoiDeLaCompositionDuMenage : Dictionary<CompositionDuMenage, double>
-  m_LoiDuCycleDeVie : Dictionary<CycleDeVie, double>
-  m_LoiDuRevenu : Dictionary<Revenu, double>
-  m_LoiDuStatutOccupation : Dictionary<StatutOccupation, double>
-  m_LoiDuTypeHabitat : Dictionary<TypeHabitat, double>

- Propriétés

-  LoiDeLaCompositionDuMenage { get; } : Dictionary<CompositionDuMenage, double>
-  LoiDuCycleDeVie { get; } : Dictionary<CycleDeVie, double>
-  LoiDuRevenu { get; } : Dictionary<Revenu, double>
-  LoiDuStatutOccupation { get; } : Dictionary<StatutOccupation, double>
-  LoiDuTypeHabitat { get; } : Dictionary<TypeHabitat, double>

- Méthodes

-  ConstruireLesTablesDeProbabilites(DonneeEcoSpatiale donneeEcoSpatiale, StructureDemographique structDemo) : void
-  LoisDeProbabilite()

DonneeEcoSpatiale
Struct

⊕ Champs

☐ Propriétés

- 📄 PartLocApptCAE { get; } : double
- 📄 PartLocApptCSE { get; } : double
- 📄 PartLocApptFMP { get; } : double
- 📄 PartLocApptPS { get; } : double
- 📄 PartLocMaisonCAE { get; } : double
- 📄 PartLocMaisonCSE { get; } : double
- 📄 PartLocMaisonFMP { get; } : double
- 📄 PartLocMaisonPS { get; } : double
- 📄 PartPropApptCAE { get; } : double
- 📄 PartPropApptCSE { get; } : double
- 📄 PartPropApptFMP { get; } : double
- 📄 PartPropApptPS { get; } : double
- 📄 PartPropMaisonCAE { get; } : double
- 📄 PartPropMaisonCSE { get; } : double
- 📄 PartPropMaisonFMP { get; } : double
- 📄 PartPropMaisonPS { get; } : double
- 📄 RevenuCoupleAvecEnfant { get; } : Revenu
- 📄 RevenuCoupleSansEnfant { get; } : Revenu
- 📄 RevenuFamilleMonoParentale { get; } : Revenu
- 📄 RevenuPersonneSeule { get; } : Revenu

☐ Méthodes

- 🔗 SetPartsDesLocatairesAppartement(double ps, double cse, double cae, double fmp) : void
- 🔗 SetPartsDesLocatairesDeMaison(double ps, double cse, double cae, double fmp) : void
- 🔗 SetPartsDesProprietairesAppartement(double ps, double cse, double cae, double fmp) : void
- 🔗 SetPartsDesProprietairesDeMaison(double ps, double cse, double cae, double fmp) : void
- 🔗 SetRevenus(Revenu ps, Revenu cse, Revenu cae, Revenu fmp) : void

ReseauBayesien
Class

⊕ Champs

☐ Propriétés

- 📄 BaseDeConnaissance { get; } : BaseDeConnaissance
- 📄 Probabilite { get; set; } : LoisDeProbabilite
- 📄 QualiteEnvironnementale { get; } : double

☐ Méthodes

- 🔗 PropensionAMigrer() : double
- 🔗 ReseauBayesien(BaseDeConnaissance baseDeConnaissance, double qualiteEnvResi)
- 🔗 ValeurDuConfortResidentiel() : double

StructureDemographique
Struct

- Champs
- Propriétés
 - AgeCoupleAvecEnfant { get; } : int
 - AgeCoupleSansEnfant { get; } : int
 - AgeFamilleMonoParentale { get; } : int
 - AgePersonneSeule { get; } : int
 - NbreCouplesAvecEnfant { get; set; } : int
 - NbreCouplesSansEnfant { get; set; } : int
 - NbreFamillesMonoParentales { get; set; } : int
 - NbrePersonnesSeules { get; set; } : int
 - TauxDeDecohabitation { get; set; } : double
 - TauxDeDissolution { get; set; } : double
 - TauxDesUnions { get; set; } : double
- Méthodes

BaseDeConnaissance
Struct

- Champs
- Propriétés
 - NiveauDeRevenu { get; set; } : Revenu
 - PositionDansLeCycleDeVie { get; set; } : CycleDeVie
 - Statut { get; set; } : StatutOccupation
 - TypeDeLogementOccupe { get; set; } : TypeHabitat
 - TypeDeMenage { get; set; } : CompositionDuMenage
- Méthodes

Vue statique des classes logicielles de l'interface utilisateur de VisualSimores

ParametrageDesEtatsStatiques
Class
→GroupBox

- Champs
- Propriétés
 - CouleurCommerce { get; set; } : Color
 - CouleurEau { get; set; } : Color
 - CouleurEquipement { get; set; } : Color
 - CouleurEspaceVert { get; set; } : Color
 - CouleurReseau { get; set; } : Color
 - CouleurZoneConstructible { get; set; } : Color
- Méthodes
 - ClickOnChoixDeCouleurEtatStatique(object sender, EventArgs arg) : void
 - ParametrageDesEtatsStatiques()

ParametresSpatioTemporels
Class
→GroupBox

- Champs
- Propriétés
 - LaDureeTotaleDeSimulation { get; } : int
 - LaResolutionSpatiale { get; } : int
- Méthodes
 - AffecterLaDureeTotalDeSimulation(object sender, EventArgs arg) : void
 - AffecterLaResolutionSpatiale(object sender, EventArgs arg) : void
 - ParametresSpatioTemporels()

ParametresDemographiques

Class

→GroupBox

+ Champs

- Propriétés

-  LaStructureDemographique { get; } : StructureDemographique
-  LesDonneesEcoSpatiales { get; } : DonneeEcoSpatiale

- Méthodes

-  AffecterLaPartDesLocatairesAppartement(object sender, EventArgs args) : void
-  AffecterLaPartDesLocatairesDeMaison(object sender, EventArgs args) : void
-  AffecterLaPartDesProprietairesAppartement(object sender, EventArgs args) : void
-  AffecterLaPartDesProprietairesDeMaison(object sender, EventArgs args) : void
-  AffecterLaValeurDesEffectifs(object sender, EventArgs arg) : void
-  AffecterLaValeurDesRevenus(object sender, EventArgs args) : void
-  AffecterLaValeurDesTaux(object sender, EventArgs arg) : void
-  AffecterLesAges(object sender, EventArgs args) : void
-  ParametresDemographiques()

BoiteDesParametres

Class

→Form

- Champs

-  m_ParametresDemographique : ParametresDemographiques
-  paramDynamique : ParametrageDesEtatsDynamiques
-  paramSpatioTemporel : ParametresSpatioTemporels
-  paramStatique : ParametrageDesEtatsStatiques

- Propriétés

-  LesParametresDemographiques { get; } : ParametresDemographiques
-  LesParametresDynamiques { get; } : ParametrageDesEtatsDynamiques
-  LesParametresSpatioTemporels { get; } : ParametresSpatioTemporels
-  LesParametresStatiques { get; } : ParametrageDesEtatsStatiques

- Méthodes

-  BoiteDesParametres()

FenetreEnfant 

Class
→ Form

+ Champs

[-] Propriétés

-  AgentsPlot { get; } : AgentsPlotTabControl
-  AgentsResidentiels { get; set; } : MenagesDuSysteme
-  BarreDeProgression { get; } : ToolStripProgressBar
-  CellulesSimulables { get; } : List<Cellule>
-  CellulesVisibles { get; } : List<Cellule>
-  CleValeurEtatCouleur { get; } : Dictionary<EtatPossible, Color>
-  CommandePause { get; set; } : bool
-  CompteurDuTemps { get; set; } : int
-  ConteneurPrincipal { get; } : SplitContainer
-  ConteneurSecondaire { get; } : SplitContainer
-  DictionnaireDesParametres { get; } : EtatDictionarySet
-  DureeTotalDeSimulation { get; } : int
-  EnsembleDesLogements { get; } : List<Cellule>
-  ImageBox { get; } : PictureBox
-  InterfaceDesParametres { get; } : BoiteDesParametres
-  LabelDeFinition { get; } : ToolStripLabel
-  LabelGeneric { get; } : ToolStripLabel
-  ListeDesCellules { get; } : List<Cellule>
-  LogementsPlot { get; } : LogementsPlotTabControl
-  NbreAppartEnLocation { get; } : int
-  NbreAppartEnPropriete { get; } : int
-  NbreDeMaisonsEnLocation { get; } : int
-  NbreDeMaisonsEnPropriete { get; } : int
-  PanneauDeDonnees { get; } : SplitterPanel
-  PanneauDeGraphe { get; } : SplitterPanel
-  PanneauPrincipal { get; } : SplitterPanel
-  ReseauDesCellules { get; } : ReseauCellulaire
-  StatDesLogements { get; } : Dictionary<string, Dictionary<int, int>>
-  StatDesMenages { get; } : Dictionary<string, Dictionary<int, int>>
-  StatGridDesLogements { get; } : StatGridView
-  StatGridDesMenages { get; } : StatGridView
-  ZoneEtude { get; set; } : Bitmap

[-] Méthodes

-  ArreterLaSimulation() : void
-  DemarrerLaSimulation() : void
-  FenetreEnfant()
-  InitialisationDesParametres() : void
-  LancerLaSimulation(object sender, EventArgs args) : void
-  ModeAleatoirePourSimuler() : void
-  ModeManuelPourSimuler() : void
-  ModePseudoAleatoirePourSimuler() : void
-  SuspendreLaSimulation() : void

FenetrePrincipale

Class

→ Form

+ Champs

- Méthodes

- BarreOutilsAide() : ToolStrip
- BarreOutilsAvance() : ToolStrip
- BarreOutilsStandard() : ToolStrip
- ChargementDesBitmap() : void
- ChargerUnBitmapDepuisLeDisque() : void
- ClickOnAbout(object sender, EventArgs ea) : void
- ClickOnAffichageNormal(object sender, EventArgs ea) : void
- ClickOnAffichageOutilAvance(object sender, EventArgs ea) : void
- ClickOnAffichageOutilDocumentation(object sender, EventArgs ea) : void
- ClickOnAffichageOutilStandard(object sender, EventArgs ea) : void
- ClickOnAffichageVolets(object sender, EventArgs args) : void
- ClickOnAfficherCarroyage(object sender, EventArgs args) : void
- ClickOnAjouter(object sender, EventArgs ea) : void
- ClickOnAnnuler(object sender, EventArgs ea) : void
- ClickOnApercuAvantImpression(object sender, EventArgs ea) : void
- ClickOnColler(object sender, EventArgs ea) : void
- ClickOnCopier(object sender, EventArgs ea) : void
- ClickOnCouper(object sender, EventArgs ea) : void
- ClickOnDocumentationGuide(object sender, EventArgs args) : void
- ClickOnDocumentationTechnique(object sender, EventArgs args) : void
- ClickOnDocumentationThese(object sender, EventArgs ea) : void
- ClickOnEnregistrer(object sender, EventArgs ea) : void
- ClickOnEvolutionLogement(object sender, EventArgs ea) : void
- ClickOnEvolutionMenage(object sender, EventArgs ea) : void
- ClickOnFermer(object sender, EventArgs ea) : void
- ClickOnFermerLesProjets(object sender, EventArgs ea) : void
- ClickOnImprimer(object sender, EventArgs ea) : void
- ClickOnMiseEnPage(object sender, EventArgs ea) : void
- ClickOnNePasAfficherCarroyage(object sender, EventArgs args) : void
- ClickOnNouveauProjet(object sender, EventArgs ea) : void
- ClickOnOuvrirUnProjet(object sender, EventArgs ea) : void
- ClickOnParametre(object sender, EventArgs ea) : void
- ClickOnPause(object sender, EventArgs ea) : void
- ClickOnPlay(object sender, EventArgs ea) : void
- ClickOnPleinEcran(object sender, EventArgs ea) : void
- ClickOnQuitter(object sender, EventArgs ea) : void
- ClickOnRetablir(object sender, EventArgs ea) : void
- ClickOnSimulationModeAleatoire(object sender, EventArgs args) : void
- ClickOnSimulationModeManuel(object sender, EventArgs args) : void
- ClickOnSimulationModePseudoAleatoire(object sender, EventArgs args) : void
- ClickOnStatistiques(object sender, EventArgs args) : void
- ClickOnStatistiqueSurLesLogements(object sender, EventArgs args) : void
- ClickOnStatistiqueSurLesMenages(object sender, EventArgs args) : void
- ClickOnStop(object sender, EventArgs ea) : void
- ClickOnSupprimer(object sender, EventArgs ea) : void
- ClickOnWeb(object sender, EventArgs ea) : void
- DispositionDesFenetres(object sender, EventArgs ea) : void
- DropDownOpeningAffichage(object sender, EventArgs ea) : void
- DropDownOpeningEdition(object sender, EventArgs ea) : void
- DropDownOpeningFenetre(object sender, EventArgs ea) : void
- DropDownOpeningFichier(object sender, EventArgs ea) : void
- DropDownOpeningSimulation(object sender, EventArgs ea) : void
- DropDownOpeningStatistique(object sender, EventArgs ea) : void
- FenetrePrincipale()
- MenuAffichage() : ToolStripMenuItem
- MenuAide() : ToolStripMenuItem
- MenuEdition() : ToolStripMenuItem
- MenuFenetre() : ToolStripMenuItem
- MenuFichier() : ToolStripMenuItem
- MenuSimulation() : ToolStripMenuItem
- MenuStatistiques() : ToolStripMenuItem
- RemplissageOutils1() : void
- RemplissageOutils2() : void

Table des tableaux

Tableau 2.1 : Evolution du statut d'occupation 1992-1996 selon le type d'espace	64
Tableau 2.2 : Evolution du statut d'occupation 1984-1996 selon le type d'espace et le type d'habitat ..	64
Tableau 2.3 : Statistiques sur la variable statut d'occupation depuis 1984 à 2002.....	65
Tableau 2.4 : Espérance de vie.....	68
Tableau 2.5 : Age de la personne de référence des ménages à l'horizon 2015 dans la CAGB	69
Tableau 2.6 : Volume des constructions neuves entre 1990 et 2003 dans la CAGB.....	72
Tableau 7.1 : Données brutes extraites de l'Enquête Ménages Déplacements	209
Tableau 7.2 : Récapitulatif des principales données de calibrage sans pondération	209

Table des figures

Figure 1.1 : Les quatre principales formes de mobilité.....	28
Figure 1.2 : La mobilité des populations dans le temps et l'espace.....	37
Figure 1.3 : Le Schéma de Cohérence Territoriale.....	41
Figure 1.4 : Les périmètres d'intervention au sein de SCoT de la CAGB.....	42
Figure 2.1 : Dynamiques habitat-habitants.....	56
Figure 2.2 : Dynamique temporelle de la mobilité résidentielle.....	60
Figure 2.3 : Interactions entre les déterminants de la mobilité.....	61
Figure 2.4 : Statut d'occupation	62
Figure 2.5 : Le revenu	67
Figure 2.6 : Le niveau d'études.....	67
Figure 2.7 : L'âge.....	68
Figure 2.8 : Composition du ménage	69
Figure 2.9 : Type d'habitat	71
Figure 2.10 : Environnement résidentiel	73
Figure 3.1 : Le zonage en aires urbaines	88
Figure 3.2 : Conception systémique de la ville	92
Figure 3.3 : Typologie des objets géographiques primitifs et statiques	102
Figure 4.1 : Architecture d'agent réactif	126
Figure 4.2 : Architecture d'agent BDI	127
Figure 4.3 : La relation micro-macro dans les SMA.....	128
Figure 4.4 : Articulations entre échelles micro et macro dans un SMA géographique.....	129
Figure 4.5 : Méthodologie orientée agent en géographie.....	131
Figure 4.6 : Interaction entre agents route et bâtiment.....	139
Figure 4.7 : Généralisation cartographique d'une base de données géographique.....	139
Figure 5.1 : Quelques voisinages usuels.....	149
Figure 5.2 : Couplage conceptuel SMA-AC.....	155
Figure 5.3 : Vue d'ensemble de l'architecture de ISLAND.....	160
Figure 5.4 : Résultats de simulation en 1994 de l'évolution de l'espace rouennais depuis 1950 avec SpaCelle	163
Figure 6.1 : Représentation graphique d'un réseau bayésien à n variables	171
Figure 6.2 : Illustration d'un graphe orienté.....	174
Figure 6.3 : Graphe causal de la base de connaissance du ménage.....	180
Figure 6.4 : Application du carroyage à la zone d'étude.....	183
Figure 6.5 : Allure d'une fonction Sigmoïde.....	184
Figure 6.6 : Structure de la table de contingence.....	185
Figure 6.7 : Algorithme de Génération de Table de Contingence Spatiale.....	186
Figure 6.8 : Calcul de la matrice de transition.....	187
Figure 6.9 : Algorithme de prise de décision atomique d'un agent BDI résidentiel.....	190
Figure 6.10 : Equations algorithmiques de la formation de nouveaux ménages.....	194
Figure 6.11 : Algorithme des règles de transition selon le voisinage et le potentiel.....	197
Figure 6.12 : Algorithme des règles de transition selon le comportement des ménages	198
Figure 7.1 : Interface utilisateur de <i>VisualSimores</i>	204
Figure 7.2 : Vue statique de <i>VisualSimores</i> après une simulation	205
Figure 7.3 : Interface de paramétrage et d'initialisation de <i>VisualSimores</i>	206
Figure 7.4 : Présentation de la zone d'application	207
Figure 7.5 : Du carroyage à la configuration initiale de 2005	211
Figure 7.6 : Couleurs affectées aux différentes occupations du sol	211

Figure 7.7 : Evolution de l'habitat dans le scénario 1.....	213
Figure 7.8 : Distribution spatiale de l'habitat en 2015 d'après le scénario 1.....	213
Figure 7.9 : Evolution de l'habitat dans le scénario 2	214
Figure 7.10 : Distribution spatiale de l'habitat en 2015 d'après le scénario 2.....	215
Figure 7.11 : Mise en évidence des résultats entre 2015 et 2020 d'après le scénario 2	216
Figure 7.12 : Evolution de l'habitat dans le scénario 3	217
Figure 7.13 : Distribution spatiale de l'habitat en 2015 d'après le scénario 3.....	218

MODÉLISATION ET SIMULATION MULTI-AGENTS DE LA DYNAMIQUE URBAINE

APPLICATION À LA MOBILITÉ RÉSIDENIELLE

Résumé

A partir d'une réflexion conceptuelle et méthodologique pour un réel couplage des automates cellulaires et des modèles multi-agents, le modèle de simulation *VisualSimores* a été conçu pour répondre, en partie, aux problématiques de simulation de la mobilité résidentielle en milieu urbain.

L'intérêt majeur de cette approche réside dans la mise en exergue, dans une perspective d'aide à la décision en aménagement et urbanisme, des rapports qu'entretiennent entre eux, deux phénomènes séparément observables : la mobilité résidentielle des ménages d'une part et les changements urbains d'autre part. La difficulté de l'exercice apparaît immédiatement : il s'agit de cerner les liens qui, à certains types de ménages font correspondre des catégories de logements et vice versa. Plus largement, il s'agit d'identifier les logiques selon lesquelles les ménages expriment et concrétisent leur choix résidentiels. Dans cette perspective, et en raison de la nature complexe du système urbain, la combinaison d'un modèle d'automates cellulaires contraint par un modèle bayésien du comportement des ménages et le paradigme multi agents se révèle plus appropriée.

Mots clés : Agents, automate cellulaire, comportement, mobilité résidentielle, complexité.

AGENT BASED MODELLING AND SIMULATION OF THE URBAN DYNAMIC

APPLICATION ON RESIDENTIAL MOBILITY

Abstract

From a conceptual and methodological reflection about an effective association of system based cellular automata and multi-agents models, the simulation model *VisualSimores* was conceived in order to give even partially, a response concerning the impact of residential mobility in urban areas.

According to the goal to develop a support system for urban planning, the major interest of this approach is to focus on the relationship between two separately observable phenomena: the residential mobility of household on one hand and the urban dynamics on the other hand. Then it becomes particularly important to identify the reasoning that helps to establish a correspondence between the demands of different types of household and residential offer of housing and vice versa. Moreover the strategies should be identified according to which household express and accomplish their residential choices. In this perspective, and because of the complex nature of the urban system, the combination of cellular automata based model constrained by the behavior of household modeled in terms of bayesian network in association with multi agents paradigm turned out to be a powerful approach.

Keywords : Agents, cellular automata, behavior, residential mobility, complexity.