

THESE

En vue de l'obtention du : **DOCTORAT**

Centre de recherche : Centre de Recherche Rabat Information Technology

Structure de Recherche : Laboratoire de Recherche en Informatique et Télécommunications

Discipline : Sciences de l'ingénieur

Spécialité : Informatique et télécommunications

Présentée et soutenue le 13/07/2019 par :

El arbi EL ALAOUY

**Contribution à la conception d'un système informatique
d'aide à la décision centré sur une approche d'alliance SMA
et AC : Application à la simulation de la mobilité résidentielle**

JURY

Rachid OULAD HAJ THAMI	PES	École Nationale Supérieure d'Informatique et d'Analyse des Systèmes, Université Mohammed V de Rabat	Président
Moulay Driss RAHMANI	PES	Faculté des Sciences, Université Mohammed V de Rabat	Directeur de thèse
Khadija RHOULAMI	PH	Faculté des Lettres et Sciences Humaines, Université Mohammed V de Rabat	Co-encadrante
Salma MOULINE	PES	Faculté des Sciences, Université Mohammed V de Rabat	Rapporteur
Youssef FAKHRI	PH	Faculté des Sciences, Université Ibn Tofail, Kénitra	Rapporteur
Mohammed OUMSIS	PES	École Supérieure de Technologie de Salé, Université Mohammed V de Rabat	Examineur

Année universitaire : 2018/2019

AVANT PROPOS

Les travaux de recherche présentés dans ce mémoire ont lieu au Laboratoire de Recherche en Informatique et Télécommunication (LRIT), à la Faculté des Sciences de Rabat (FSR), sous la direction du Professeur Moulay Driss RAHMANI et le co-encadrement du Professeur Khadija RHOULAMI.

Je souhaite, en premier lieu, exprimer mes plus vifs remerciements à feu le professeur **Driss ABOUTAJDINE**, pour m'avoir accueilli dans son laboratoire. Je ne crois pas que j'oublierai son sourire lors des remises des primes d'excellence à la Faculté des Sciences pour notre promotion 2007-2009 de l'École Supérieure de Technologie Salé. Qu'ALLAH le récompense par le bien et lui accorde le pardon et la miséricorde pour tous le bien qu'il a fait.

Je tiens à exprimer aussi ma gratitude à mon directeur de thèse, **M. Moulay Driss RAHMANI**, professeur de l'enseignement supérieur à la Faculté des sciences de Rabat (FSR). Je le remercie pour l'opportunité qu'il m'a offerte en m'accueillant dans son équipe de recherche. Merci d'avoir cru en moi et m'avoir montré les portes qu'il fallait ouvrir pour que ce travail soit à la hauteur.

Je tiens à remercier également mon co-encadrante, **Mme Khadija RHOULAMI**, professeur habité à la Faculté des Lettres et Sciences Humaines de Rabat (FLSH-R). Je la remercie pour toutes ses années de soutien, sa disponibilité, ses encouragements et ses conseils pertinents.

Je remercie chaleureusement **M. Rachid Oulad Haj THAMI**, professeur de l'enseignement supérieur à l'École Nationale Supérieure d'Informatique et d'Analyse des Systèmes de Rabat (ENSIAS) qui m'a fait l'honneur d'accepter la présidence du jury de cette thèse.

Je remercie également **Mme Salma MOULINE**, professeur de l'enseignement supérieur à la Faculté des sciences de Rabat (FSR), d'avoir accepté de rapporter ma thèse. Je la remercie particulièrement pour le temps et l'effort qu'elle a consacré à lire et évaluer ce mémoire de thèse.

Un grand merci à **M. Mohammed OUMSIS**, professeur de l'enseignement supérieur à l'École supérieure de Technologie de Salé (EST-S), d'avoir accepté d'examiner mon travail de thèse et de participer au jury final en tant qu'examinateur. Je le remercie également pour le temps et l'effort qu'il a consacré à lire et évaluer mon travail.

Je remercie vivement **M. Youssef FAKHRI**, Professeur Habilité à la Faculté des sciences de Kenitra (FSK), d'avoir accepté de rapporter ce travail. Je le remercie aussi pour le temps et l'effort qu'il a consacré à lire et évaluer mon travail. Une sincère gratitude pour l'être méthodique que vous êtes.

Je profite de l'occasion pour exprimer ma reconnaissance à tous mes enseignants durant mon cursus universitaire, à commencer par mes enseignants du département d'informatique, à l'Ecole Supérieure de Technologie de Salé, dirigé en ce temps par le professeur **Ali LASFAR**, mes enseignants dans la Licence Professionnelle Réseaux et Télécommunication coordonnée par le professeur **Mohammed OUADDOU** et mes enseignants du Master Informatique et Télécommunications de la Faculté des Sciences Rabat coordonnée en ce temps par madame le professeur **Salma MOULINE**.

Au cours de la préparation de ma thèse, j'ai bénéficié d'une bourse d'excellence octroyée par le Centre National en Recherche Scientifique et Technique (CNRST), et ce dans le cadre du programme des bourses d'excellences de recherche initié par le ministère de l'Éducation Nationale, de l'Enseignement Supérieur, de la Formation des Cadres et de la Recherche Scientifique.

RÉSUMÉ

Un objectif de moyen terme auquel réfléchit notre équipe de recherche est le développement d'une plateforme d'aide à la décision de simulation de systèmes urbains. Cette plateforme doit prendre en compte simultanément la dimension spatiale et les actions résidentielles des différents acteurs urbains des problématiques abordées.

Encadré par cette ambition, nous nous intéressons dans ce travail de thèse, à l'étude des approches systèmes multi-agent et automates cellulaire, leurs principes sur lesquels reposent et leur appropriation avec la modélisation et la simulation des systèmes urbains. Nous nous concentrons ensuite sur la modélisation et la simulation de la mobilité résidentielle, le premier champ d'application de notre approche d'alliance de systèmes multi-agents et automates cellulaires. Nous élaborons une modélisation UML 2.0 centrée sur notre approche d'alliance de systèmes multi-agents et automates cellulaires. Nous élaborons également notre modèle informatique de simulation de la mobilité résidentielle en prenant en compte la dimension spatiale et les comportements individuels des ménages composant la population de l'espace urbain étudié.

Pour concrétiser notre approche théorique, nous implémentons notre modèle et simulateur de mobilité résidentielle moyennant le langage de programmation Java et la plateforme Jade de développement de SMA. Nous effectuons finalement une expérimentation de validation du modèle pour évaluer son fonctionnement.

Mots-clés : modélisation et simulation, modèle informatique ; simulation urbaine ; mobilité résidentielle ; automate cellulaire ; systèmes multi-agents.

ABSTRACT

A medium-term goal of our research team is the development of a decision support platform for simulating urban systems. This platform must simultaneously take into account the spatial dimension and the residential actions of urban actors of the addressed urban problems.

Oriented by this ambition, we are interested in this thesis, firstly to the study of multi-agent systems and cellular automata, its principles on which it are based on and its appropriation with the modeling and simulation of urban systems. We then focus on the modeling and simulation of residential mobility, the first field of application of alliance approach of multi-agent systems and cellular automaton. We design a UML 2.0 modeling based on our approach of this alliance of multi-agent systems and cellular automaton. We also design our computer simulation model of residential mobility taking into account the spatial dimension and the individual behaviors of the households making up the population of the studied urban space.

To realize our theoretical approach, we implement our residential mobility model and simulator using the Java programming language and the Jade development platform. We finally perform an experiment of model's validation to evaluate the model's functioning.

Keywords: computer model; urban simulation; residential mobility; cellular automaton; multi-agent systems.

TABLE DES MATIÈRES

AVANT PROPOS.....	3
RÉSUMÉ.....	5
ABSTRACT.....	6
TABLE DES MATIÈRES	7
LISTE DES ABRÉVIATIONS.....	12
LISTE DES FIGURES.....	13
CHAPITRE 1. CONTEXTE ET GÉNÉRALITÉS	15
1.1. Contexte et problématique	15
1.1.1 La modélisation et la simulation	15
1.1.2 Des problèmes urbains à résoudre.....	16
1.1.3 La mobilité résidentielle comme problématique.....	16
1.1.4 Objectifs de la recherche	17
1.1.5 Organisation du mémoire	19
1.2. Généralités.....	20
1.2.1 L'aide à la décision	20
1.2.1.1 La décision	20
1.2.1.2 L'aide à la décision	20
1.2.1.3 Systèmes d'aide à la décision (SAD).....	21
1.2.1.4 Architecture de SAD	22
1.2.2 La modélisation et la simulation	22
1.2.2.1 Une étape essentielle	23
1.2.2.2 Définition des termes	23
1.2.2.3 Une plateforme de M&S	24
1.2.2.4 Les types de modèles.....	25
1.2.3 Les Systèmes multi-agents.....	27
1.2.3.1 Origine des SMA.....	27

1.2.3.2 La notion d'agent	27
1.2.3.3 Un système multi-agents	28
1.2.3.4 Catégories d'agents	29
Les agents réactifs	29
Les agents cognitifs	30
1.2.3.5 Architecture des agents	30
Architecture de subsumption.....	30
Architecture BDI	31
1.2.3.6 Différence entre agents et objets	32
1.2.3.7 Interactions des agents	33
Communication via l'environnement.....	33
Communication via le tableau noir	33
Communication via l'envoi de messages	34
1.3. Conclusion.....	34
CHAPITRE 2. AUTOMATE CELLULAIRE ET MODÉLISATION URBAINE	35
2.1. Contexte et objectif	35
2.2. Concepts de base	36
2.2.1 La cellule	37
2.2.2 L'état	37
2.2.3 Le voisinage	37
2.2.4 La règle de transition.....	38
2.2.5 Le temps	39
2.3. Notation mathématique et applications d'AC	40
2.3.1 Représentation mathématique	40
2.3.2 Domaines d'application.....	41
2.3.3 Appropriation d'AC pour la modélisation urbaine	42
2.4. AC pour la modélisation urbaine	43

2.4.1 De la revue à la spécification du modèle AC	43
2.4.2 Une discussion des choix	45
2.4.2.1 Quel arrangement choisir?	45
2.4.2.2 Comment identifier les états de l'AC ?	45
2.4.2.3 Quelle forme de cellules choisir ?	45
2.4.2.4 Qu'est ce qui détermine la résolution spatiale ?.....	46
2.4.2.5 Quel type de voisinage choisir ?	46
2.4.2.6 Comment déterminer le temps ?.....	47
2.4.2.7 Quelle règle de transition utiliser ?	47
2.5. Conclusion.....	48
CHAPITRE 3. MODÈLE INFORMATIQUE DE MOBILIÉ RÉSIDENTIELLE.....	49
3.1. Intérêts de la simulation de la mobilité résidentielle.....	49
3.2. Approches de modélisation urbaine	50
3.2.1 L'approche régionale.....	50
3.2.2 L'approche statistique	51
3.2.3 L'approche Automate cellulaire.....	51
3.2.4 L'approche multi-agents	53
3.2.5 L'approche d'alliance de SMA-AC	55
3.3. Description générale du modèle développé	58
3.3.1 Travaux connexes.....	58
3.3.2 Hypothèse de fonctionnement	64
3.3.3 Objectif du modèle proposé	65
3.4. Description détaillée du modèle.....	66
3.4.1 Le sous modèle d'AC	67
3.4.2 Le sous modèle de Chaîne de Markov	68
3.4.3 Le sous modèle de Systèmes multi agents	70

3.4.4 Le sous modèle de Réseaux bayésiens.....	71
3.4.5 Le sous modèle de projection de population.....	74
3.5. Origines et spécificités du modèle	75
3.6. Conclusion.....	79
CHAPITRE 4. IMPLÉMENTATION ET EXPÉRIMENTATION.....	80
4.1. Choix des technologies.....	80
4.1.1 JAVA.....	80
4.1.2 Plateformes agent	81
4.1.3 JADE	83
4.2. Description du développement.....	84
4.2.1 Configuration de l'ordinateur.....	84
4.2.2 Modules de l'application	84
4.3. Application de simulation	85
4.3.1 L'interface graphique	85
4.3.2 Menus.....	86
4.3.3 Paramètres d'affichage de la grille par défaut.....	86
4.3.4 Spécification des données et paramètres de la simulation	86
4.3.5 Chargement de la cartographie de la zone d'étude	87
4.3.6 Exécution.....	88
4.3.7 Enregistrement du résultat de simulation	88
4.3.8 Editeur de carte imbriqué	89
4.4. Sources de données du modèle.....	89
4.4.1 Sources de données	90
4.4.2 Formats des données du modèle.....	91
4.5. Expérimentation	92
4.6. Conclusion.....	95
CHAPITRE 5. MODÉLISATION UML 2.0 DE LA MOBILITÉ RÉSIDEN- TIELLE	96

5.1. Introduction	96
5.1.1 Contexte	96
5.1.2 Objectif du modèle UML 2.0	97
5.2. Système urbain à modéliser.....	97
5.2.1 Besoins du système	98
5.2.2 Description détaillée du système.....	98
5.3. Description détaillée du modèle	101
5.3.1 Représentation de l'espace urbain.....	101
5.3.2 Représentation de la population	102
5.3.3 Représentation dynamique de l'espace	103
5.3.4 Représentation dynamique de la population	104
5.3.5 Interconnexion des processus.....	105
5.3.6 Structure du modèle	106
5.4. Conclusion.....	108
CHAPITRE 6. CONCLUSION ET PERSPECTIVES	109
LISTE DES PUBLICATIONS.....	111
BIBLIOGRAPHIE	112

LISTE DES ABRÉVIATIONS

SMA	Systèmes multi-agents
AC	Automate cellulaire
UML	Unified Modelling Language
SAD	Système d'Aide à la Décision
BDI	Belief Desire Intention
MR	Mobilité Résidentielle
CNRST	Centre National de la Recherche Scientifique et Technique
M&S	Modélisation et Simulation
SVM	Support Vector Machine
KQML	Knowledge Query and Manipulation Language
ACL	Agent Communication Language
FIPA	Foundation for Intelligent Physical Agents
SIG	Système d'Information Géographique
HCP	Haut-Commissariat au Plan
JVM	Java Virtual Machine
GNU GPL	GNU General Public License
API	Application Programming Interface
GNU LGPL	GNU Lesser General Public License
MASON	Multi-Agent Simulator Of Neighborhoods... or Networks
JADE	Java Agent DEvelopment Framework
MadKit	Multiagent Development Kit
LUC	Land Use Change

LISTE DES FIGURES

Figure 1 Composants d'un système d'aide à la décision.....	22
Figure 2 la simulation par ordinateur [8]	24
Figure 3 Composants d'une plateforme de M&S	25
Figure 4 Interaction d'un agent avec son environnement et d'autres agents [Ferber [15]]	29
Figure 5 Principe de l'architecture de subsumption	31
Figure 6 une architecture BDI.....	32
Figure 7 une simple simulation d'AC du 'jeu de la vie' de Conway	37
Figure 8 Types de voisinage (I) Von Neumann, (II) Moore, (IV) mélange de Moore & Von Neumann.	38
Figure 9 Modèles de règle de transition (adaptée depuis [27]).....	39
Figure 10 Cycle de spécification de modèles d'AC.....	43
Figure 11 l'approche stress-resistance, $t_0 < t_1 < t_2 < t_3$ indique des moments consécutives de la	58
Figure 12 Interaction des composants du système de simulation de la mobilité résidentielle.	66
Figure 13 règles de transition probabiliste moyennant les chaînes de Markov à l'instant t.....	70
Figure 14 représentation des variables dans le modèle de réseau bayésien.....	72
Figure 15 Mobilité résidentielle des agents ménages à l'instant t	73
Figure 16 Choix de logements vérifiant les désirs de l'agent à l'instant.....	74
Figure 17 le sous modèle de projection de population.....	75
Figure 18 indice de popularité des langages	81
Figure 19 Interface graphique de l'application chargeant une carte de l'occupation du sol d'une zone urbaine.	85
Figure 20 liste de menus de l'application.....	86
Figure 21 des paramètres d'affichage de la grille	86
Figure 22 Paramétrage des données et paramètres statistiques de la simulation	87
Figure 23 boîte de dialogue d'ouverture de fichier	88

Figure 24 message de confirmation de chargement de carte	88
Figure 25 boîte de dialogue d'enregistrement de fichier.....	89
Figure 26 menu saisie.....	89
Figure 27 structure de la carte de l'occupation du sol du modèle	92
Figure 28 Les cartes 2006 et 2007 de la ville.....	93
Figure 29 Zones bâties après fin de simulation.....	94
Figure 30 évolution des logements et ménages.....	95
Figure 31 Cycle d'élaboration de système informatique	97
Figure 32 Modèle d'automate cellulaire	102
Figure 33 Modèle de SMA.....	103
Figure 34 modèle de dynamique spatiale	104
Figure 35 modèle de dynamique de la population	105
Figure 36 modèle d'interconnexion des processus	107
Figure 37 Structure des objets composites	108

CHAPITRE 1. CONTEXTE ET GÉNÉRALITÉS

Dans ce chapitre d'introduction, nous exposons d'un côté le contexte, la problématique et l'objectif de ce travail de recherche, et de l'autre côté nous présentons les notions importantes qui concernent notre axe de travail à savoir les notions des systèmes d'aide à la décision, de modélisation, de simulation et de systèmes multi-agents.

1.1. Contexte et problématique

1.1.1 La modélisation et la simulation

Les décideurs d'un grand nombre de domaines s'orientent de plus en plus vers l'intégration des outils d'aide à la décision dans leur processus de décision. Ces outils ne permettent pas uniquement de rationaliser la prise de décision et éclaircir les choix mais ils constituent un bon dispositif aidant à la prise de décision participative intégrant toutes les parties prenantes. L'aide à la décision actuellement s'appuie sur la modélisation et la simulation des systèmes. La décision n'est constituée et prise qu'après exécution des scénarios de simulation par de puissants simulateurs permettant d'évaluer et vérifier les effets futurs des systèmes.

Le développement durable et la gestion urbaine sont parmi d'autres problématiques lesquelles les institutions concernées souhaitent confronter avec le plus d'éléments objectifs leur permettant de mieux éclaircir les décisions prises. Pour répondre à ce besoin d'outils d'aide à la décision, d'importants travaux de recherches sont actuellement orientés vers le développement de modèles informatiques de simulation de systèmes urbains.

Ces modèles informatiques devraient inclure plusieurs dimensions comme les dimensions sociales, économiques et spatiales. Qualifiés de capacités de prédiction et de simulation, ces modèles permettent de mieux appréhender, prédire, simuler et analyser le fonctionnement des systèmes urbains. En parallèle aux travaux de modélisation, de nombreux travaux théoriques sont aussi menés dans un objectif de proposer de nouvelles approches et paradigmes de modélisation des systèmes complexes et de développement d'outils d'aide à la décision.

1.1.2 Des problèmes urbains à résoudre

Les établissements ayant comme mission l'aménagement de territoire et la gestion de transport s'appuient progressivement sur les modèles et outils informatiques qui aident et accompagnent leur processus de décision.

Au Maroc comme ailleurs, les institutions concernées doivent faire face aux effets négatifs tant environnementaux que sociaux et économiques des problèmes urbains causés principalement par la mobilité urbaine, la croissance démographique et la circulation routière. Les gestionnaires sont donc à la recherche de systèmes d'aide à la décision qui permettent de comprendre ces phénomènes urbains et de trouver à travers des scénarios de simulation les meilleurs politiques urbaines.

Pour répondre à ces exigences, l'Université Mohammed V se positionne par rapport aux priorités de recherche nationales prescrites par le Centre National de Recherche Scientifique et Technique (CNRST), et fait de la modélisation des systèmes un de ses principaux axes de recherches. Dans ce contexte national, la mobilité résidentielle est considérée comme un domaine de recherche prioritaire.

1.1.3 La mobilité résidentielle comme problématique

La mobilité résidentielle est au centre des problèmes urbains. Il s'agit d'une problématique à laquelle sont confrontés les acteurs urbains. Comme rapporté dans [1], la mobilité urbaine est l'un des défis majeurs auxquels les responsables et les gestionnaires urbains doivent faire face. L'importance du sujet de la mobilité résidentielle réside principalement dans le défi de comprendre les choix résidentiels (notamment la décision de changement de logement et de choix de logement) des individus dans la ville, de modéliser et anticiper les effets de la mobilité et de répondre aux besoins de la société en matière d'habitat, de transport, d'infrastructures et d'équipements.

Le principal moteur de la mobilité résidentielle est la croissance démographique. D'autres facteurs s'associent pour renforcer la mobilité comme le départ des jeunes de chez leurs parents pour chercher un emploi, la création de nouveaux ménages comme dans le cas du mariage, ou bien au contraire la séparation d'un ménage comme dans le cas de divorce. À cela peuvent être ajoutés d'autres facteurs comme la qualité des résidences et de l'environnement.

Aujourd'hui dans la plupart des villes marocaines, la mobilité résidentielle est devenue un enjeu majeur au développement économique et social. La mobilité urbaine est la source de plusieurs problèmes urbains comme la mal-répartition des populations, la consommation rapide et

anarchique des terres et espaces verts, la congestion et l'insuffisance de services de base. Pour faire face à ces problèmes urbains des offres de projets de recherches, une politique de la ville et des études se lancent dont l'objectif est d'un côté la compréhension de ce phénomène urbain ses causes et ses effets et de l'autre côté, l'instauration de politiques et décisions urbaines adaptées.

Ces études menées autour de la mobilité résidentielle touchent à plusieurs aspects de la problématique : le rapport entre mobilité résidentielle et périurbanisation, mobilités disparités et inégalités territoriales, mobilités et accessibilité au transport. Elles exploitent des résultats de recensements généraux et suivent principalement une approche statistique et transversale qui permet de mesurer le phénomène de mobilité, de décrire l'évolution du phénomène dans le temps et dans l'espace et de croiser les comportements de mobilité résidentielle et les caractéristiques du logement (localisation, type d'habitat, statut d'occupation) avec celles des individus et des ménages (âge, profession, niveau de revenu, etc.) [2].

Ces études sont importantes et ne se résument pas aux résultats cités ci-dessus. Mais elles ne peuvent pas toutes seules relever ce défi urbain. Compte tenu de leur nature descriptive des phénomènes urbains, ces études ne permettent en majorité que de décrire et éclairer la réalité. En conséquence, les décisions et actions urbaines dérivées de ces études ne peuvent être que graduels ou progressives vu qu'elles sont une réaction à un fait urbain présent. Cependant, avec les faits que la populations urbaine mondiale croîtra d'environ 2,3 milliards au cours des 40 prochaines années, et jusqu'à 70% de la population mondiale vivra dans les villes d'ici 2050 [3], ces actions menées selon ces méthodes et études qui sont en majorité réactives risquent de ne pas suivre les enjeux des villes durables. Le recours aux modèles et outils informatiques d'aide à la décision qui ont des capacités de prédiction et simulation devient incontournable pour mieux aider les décideurs urbains et les aménageurs de territoire.

Les problématiques de la mobilité résidentielle sont évidemment les premiers champs d'application de nos travaux de modélisation et de simulation des systèmes urbains.

1.1.4 Objectifs de la recherche

Notre travail de recherche se focalise principalement sur la modélisation et la simulation des systèmes complexes. Un objectif principal de notre équipe de recherche est le développement d'une plateforme d'aide à la décision de simulation de systèmes urbains. Cette plateforme doit prendre en compte simultanément la dimension spatiale et les actions résidentielles des différents acteurs urbains des problématiques abordées.

Pour répondre à cette contrainte, nous décidons d'étudier quels avantages apportent l'utilisation des modèles à base d'approche bottom-up. Nous nous intéressons très spécialement à la modélisation des systèmes complexes utilisant les approches utilisant les Automates Cellulaires (AC) et Systèmes Multi-Agents (SMA).

Les modèles informatiques d'aide à la décision développés selon notre approche d'alliance de SMA et AC doivent, pour être opérationnels, utiliser l'ensemble des informations pertinentes collectées sur l'espace urbain étudié. Nous nous engageons d'étudier quels avantages apporte la fusion d'un système d'automate cellulaire et un système multi-agent au sein d'une plateforme de simulation.

La conception d'une plateforme de simulation des problématiques urbaines constitue le cadre général de notre recherche. Aussi, nous consacrons nos recherches à la spécification d'une approche d'alliance de SMA et AC pour la modélisation et la simulation urbaine que nous menons à travers une application de mobilité résidentielle. Au cours de cette recherche, nous cherchons à atteindre trois objectifs.

Notre premier objectif consiste à l'étude de l'utilisation des approches AC et SMA dans la modélisation urbaine. Nous souhaitons proposer un cadre générique pour la conception des modèles informatiques d'aide à la décision basés sur une approche d'alliance d'AC et SMA. Pour arriver à ce but, nous étudions les deux concepts en détaillant le principe sur lequel reposent, nous nous intéressons aux questions d'adaptation des deux approches à la modélisation urbaine et particulièrement à la modélisation de la mobilité résidentielle.

Notre deuxième objectif consiste à établir une modélisation UML 2.0 des systèmes d'aide à la décision de simulation de mobilité résidentielle. La conception UML 2.0 que nous souhaitons élaborer doit permettre une modélisation en se basant sur une approche d'alliance de SMA et AC et servir comme support de développement de modèles informatiques de mobilité résidentielle qui se distinguent à la fois par une dimension spatiale et une gestion des acteurs urbains à savoir les ménages qui ont des actions résidentielles notamment la décision de changement de logement et de choix de logement.

Notre troisième objectif est la concrétisation de notre approche théorique d'alliance de SMA et AC à travers le développement d'un simulateur incorporant un modèle d'informatique d'aide à la décision. Le simulateur et le modèle que nous souhaitons développer, doivent permettre la simulation de la mobilité résidentielle de la ville de Salé marocaine au cours de dix années de simulation. Le modèle doit intégrer à la fois les données sur l'espace urbain étudié et les acteurs

urbains qui s'y situent. Les expérimentations par simulateur doivent nous permettre d'évaluer la pertinence de notre approche d'alliance de SMA et AC et de valider nos travaux de recherche.

Les trois objectifs que nous nous attribuons nous conduisent à faire une vue d'ensemble du domaine de la modélisation et de la simulation depuis ses fondements théoriques jusqu'à l'étude d'un cas spécifique de système d'aide à la décision de mobilité résidentielle.

1.1.5 Organisation du mémoire

À l'exception du chapitre conclusion, ce travail est divisé en cinq chapitres qui présentent notre démarche et les résultats de nos recherches.

Dans le premier chapitre, nous exposons dans la première section le contexte, la problématique et l'objectif de notre travail de recherche, nous présentons ensuite dans la deuxième section les concepts fondamentaux en rapport avec nos recherches. Nous y introduisons les notions de systèmes d'aide à la décision. Nous exposons également les notions de modélisation et de simulation qui représentent deux étapes essentielles dans le cycle de développement de systèmes informatiques d'aide à la décision. Nous présentons à la fin de ce chapitre la notion de systèmes multi-agent puisqu'elle s'agit d'une approche centrale dans notre travail de modélisation et de simulation.

Dans le deuxième chapitre, Nous présentons notre étude de l'approche automate cellulaire. Nous exposons premièrement les fondements théoriques de l'approche, la diversité de son utilisation dans un bon nombre de domaines et ses caractéristiques qui ont fait cette approche un bon outil de modélisation urbaine. Nous présentons ensuite notre méthodologie de spécification de modèles d'AC. En appliquant cette méthodologie sur la thématique urbaine, nous menons une discussion autour des choix préliminaires préférés lors de la conception de modèles urbains.

Dans le troisième chapitre, nous présentons notre modèle informatique de simulation de la mobilité résidentielle. Nous débutons le chapitre par une présentation des approches conventionnelles de la mobilité résidentielle. Nous décrivons ensuite le contexte, l'objectif et l'approche utilisée par notre modèle. Puis nous finissons le chapitre par une description détaillée du modèle, ses composants, son origine et ses spécificités

Dans le quatrième chapitre, nous exposons l'implémentation et l'expérimentation de notre modèle informatique. Nous y explicitons les technologies choisies pour l'implémentation, une description du développement, les écrans du simulateur et modèle informatique développés. Nous présentons aussi les sources de données utilisées dans le simulateur et l'expérimentation réalisée.

Dans le cinquième chapitre, nous présentons notre modélisation UML 2.0 à base de notre approche d'alliance d'AC et SMA. Ce chapitre commence par une description du contexte et objectif de la contribution. Puis présente l'ensemble des diagrammes permettant de représenter les parties du système urbain depuis différentes vues.

1.2. Généralités

1.2.1 L'aide à la décision

1.2.1.1 La décision

La décision peut se définir comme étant un acte par lequel un décideur, qu'il soit une seule personne, un groupe de personnes ou une institution, choisisse une option parmi un ensemble d'options, après l'examen d'une situation bien précise.

La prise de décision est un aspect important des activités de gestion des entreprises et institutions. Les décisions de haute qualité devraient conduire à une meilleure production, une résolution rapide des problèmes et des organisations performantes.

Les décisions peuvent être simples en conception ou complexes. Les décisions simples sont produites souvent en suivant une approche monocritère qui évalue les différentes options en se basant sur un seul indicateur. Cette approche apparaît utile quand le système est assez simple et ne demande pas beaucoup de réflexion autour de la décision à prendre.

Cependant, quand le système est complexe, le cas par exemple de systèmes urbains et environnementaux, où le problème en question est complexe et mal-structuré, la prise d'une décision devient une tâche ardue, les décideurs dans ce cas, se trouvent incapables 1) de traiter l'information complexe pour sortir avec une décision argumentée ; 2) de se mettre en accord sur une seule décision qui satisfait aux différents intérêts ; 3) d'avoir la certitude qu'une décision donnée conduit au résultat désiré.

1.2.1.2 L'aide à la décision

En raison de l'importance et de la difficulté d'effectuer la tâche de la prise de décision, les possibilités présentées par la technologie informatique pour développer le soutien aux décideurs ont généré beaucoup d'intérêt. C'est ainsi que la décision assistée par ordinateur désignée par 'l'aide à la décision' et les systèmes d'aide à la décision commencent par émerger.

Selon Roy [4], l'aide à la décision est une activité de celui qui, prenant appui sur des modèles informatiques clairement explicités mais non nécessairement complètement formalisés, aide à

obtenir des éléments de réponse aux questions que se posent des acteurs dans un processus de décision, éléments concourant à éclairer la décision, et normalement à recommander, ou simplement à favoriser, un comportement de nature à accroître la cohérence entre l'évolution du processus d'une part, les objectifs et le système de valeurs au service desquels ces acteurs se trouvent placés d'autre part.

Cette définition signale l'importance de la théorie de la modélisation et de la simulation, elle montre aussi que l'aide à la décision exige l'élaboration et le développement de modèles informatiques et plus généralement des systèmes informatiques permettant d'apporter des éléments de réponses qui supportent les décideurs dans leur processus de prise de décision.

1.2.1.3 Systèmes d'aide à la décision (SAD)

Les systèmes d'aide à la décision sont des systèmes informatiques ayant comme mission principale l'apport de l'aide aux décideurs dans leur processus de prise de décision. Ils sont conçus pour la quête des solutions aux problèmes peu ou mal structurés [5]. Pour Checron [6], un système d'aide à la décision est un système d'information interactif destiné à exploiter des données et des modèles pour résoudre des problèmes peu ou mal structurés. Les définitions présentes mettent l'accent sur les termes système, interactif, données, modèles, problèmes peu ou mal structuré, aider qui peuvent être interprétés comme suit :

- **Système** : un système informatisé utilisant des capacités d'analyse et de modélisation dans un domaine d'application pour faciliter la prise de décision.
- **Interactif** : le système interagit avec ses utilisateurs moyennant une interface Homme-Machine (ex une interface graphique) ce qui sous-entend ergonomie et contrôle par utilisateur.
- **Données et modèles** : les données représentent la situation actuelle et les prérequis de résolution du problème. Les modèles regroupent les algorithmes et fonctions, qui appliqués sur les données, génèrent des résultats dont l'analyse produit des indicateurs de décision.
- **Problèmes non structurés** : ce sont les problèmes qui se posent dans les activités de management et de gestion. Une grande part de réflexion est faite à l'intuition et l'expérience des décideurs. Le SAD n'est qu'un élément dans le processus de prise de décision.

- **Aider** : le système s'offre comme un dispositif permettant d'amplifier la capacité de raisonnement des décideurs et non pas comme alternative à leur raisonnement par une modélisation du raisonnement des décideurs.

1.2.1.4 Architecture de SAD

Un système d'aide à la décision contient fondamentalement quatre composants :

- une base de données qui contient les données entrées et résultats du système.
- une base de modèles qui contient les modèles regroupant algorithmes et fonctions
- une base de connaissances qui contient les indicateurs de décisions extraites des données résultats du système, la base de connaissances peut être produite par un système indépendant exemple des logiciels de Business Intelligence.
- une interface homme-machine qui permet au décideur de naviguer entre les différentes fonctionnalités du système d'aide à la décision, d'importer les données et exporter les données résultats.

La Figure 1 illustre ces composants principaux d'un système d'aide à la décision.

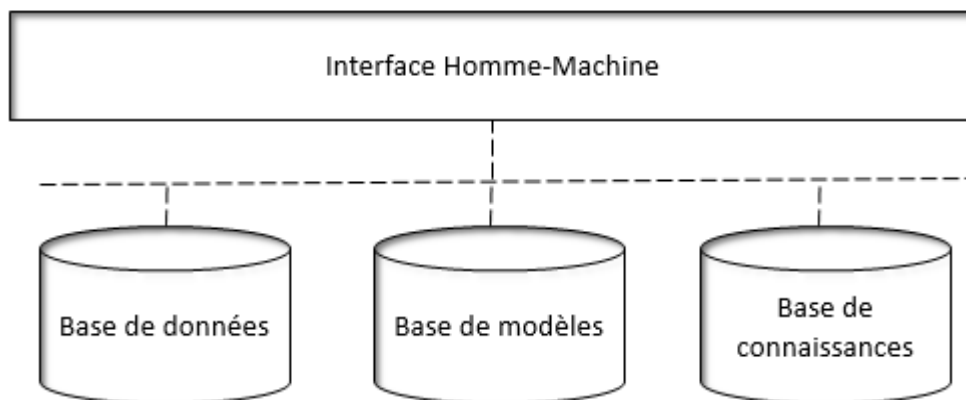


Figure 1 Composants d'un système d'aide à la décision

1.2.2 La modélisation et la simulation

Les modèles à base de simulation des systèmes complexes sont au cœur des outils informatiques d'aide à la décision. En affranchissant les limites du domaine de l'aide à la décision, nous présentons les concepts importants liés au champ de modélisation et de simulation des systèmes complexes.

1.2.2.1 Une étape essentielle

La modélisation et la Simulation (M&S) sont essentielles dans le cycle de développement des outils informatiques d'aide à la décision dans divers champs de recherche et développement. Les systèmes réels à simuler sont alors étudiés et transformés en représentations abstraites dites les modèles.

Les apports des approches à base de modélisation et simulation sont importants. Ci-dessous sont présentés les principaux apports :

- La modélisation et la simulation sont utilisées pour la conception et simulation des systèmes naturels et systèmes humains afin d'atteindre une compréhension fine du fonctionnement de ces systèmes.
- La modélisation et la simulation sont utilisées comme approche d'analyse des risques et de prévention d'accidents et pannes des systèmes. Une telle approche optimise le fonctionnement des systèmes en termes de coûts, de taux de danger survenu etc.
- La modélisation et simulation servent à économiser les coûts en utilisant des modèles permettant de concevoir et tester des produits avant que les prototypes ou les produits finaux soient conçus.
- La modélisation et la simulation permettent de faire des études prospectives en utilisant des modèles de projection qui permettent de prédire les effets futurs et les prendre en considération dans les décisions à priori.

1.2.2.2 Définition des termes

Un modèle est une représentation abstraite d'une réalité. Un modèle peut ainsi présenter un concept, un processus ou tout un système. Une représentation de réalité n'est dite modèle que s'elle permet de tirer apprentissage depuis ce modèle. Minsky a bien formalisé cela en écrivant : "pour un observateur O, R' est un modèle de R si O peut, à partir de R' on peut apprendre quelque chose d'utile sur le fonctionnement de R" [7].

Pour le mot simulation, Fishwick a essayé d'en donner une définition en écrivant : "a computer simulation is the discipline of designing a model of an actual or theoretical physical system, executing the model on a digital computer, and analyzing the execution output" [8]. Cette définition s'articule autour de trois entités essentielles : la conception du modèle, l'exécution du modèle et l'analyse de l'exécution (cf. Figure 2).

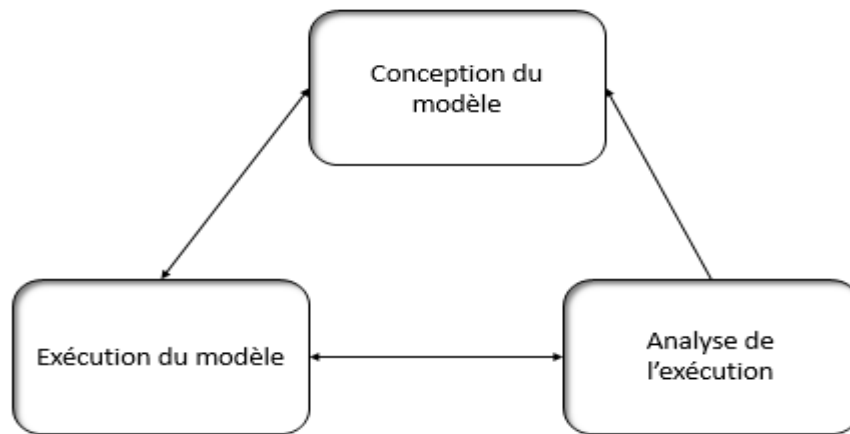


Figure 2 la simulation par ordinateur [8]

Il existe plusieurs façons pour définir un cycle de développement d'un système. Celui qui devrait être choisit est celui qui reflète bien la perspective de production des systèmes [9]. Dans un cadre de modélisation et de simulation, un processus de développement de modèles informatiques, allant du problème jusqu'à la simulation, devrait contenir principalement les quatre étapes suivantes :

1. **L'analyse.** La réalité (e.g., système, phénomène etc) est explicitée puis analysée en termes de flux entrants, de processus internes, et de flux sortants.
2. **La modélisation.** Est le processus qui mène à la conception d'un modèle de la réalité. Ce processus s'articule autour d'une méthodologie scientifique, d'une réflexion sur les points de réalité à retenir, et des règles qui régissent le système.
3. **L'implémentation.** Lors de cette étape, le modèle est codé dans un langage de programmation et incorporé dans un simulateur.
4. **La simulation.** Dans cette phase, en se basant sur des données entrées au modèle, des données sont générées constituant la base pour des solutions aux problèmes attaqués.

1.2.2.3 Une plateforme de M&S

Une plateforme typique de modélisation et de simulation devrait prendre en considération les composants suivants [10] :

- Un système source
- Un cadre expérimental
- Un modèle
- Un simulateur

- Une relation de modélisation
- Une relation de simulation

La Figure 3 donne une vue sur les différents composants et relations qui seront définis dans la suite.

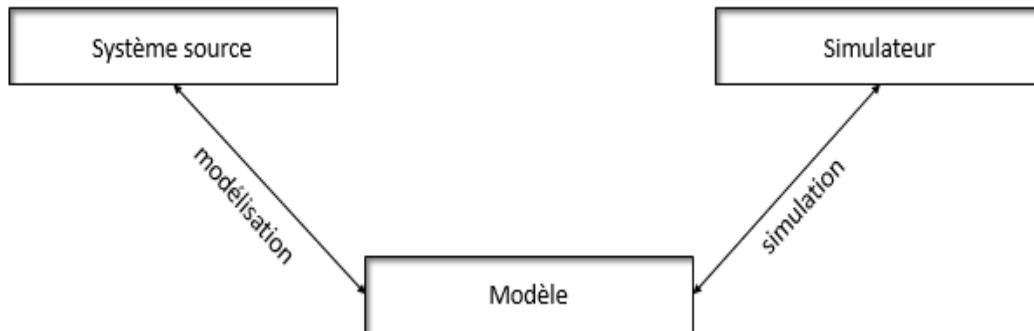


Figure 3 Composants d'une plateforme de M&S

- **Un système source.** est l'environnement réel ou virtuel que l'on essaye de modéliser. Il est la source des données.
- **Un cadre expérimental.** Il définit les limites de validité de l'approche d'expérimentation. Il est défini par les objectifs de la simulation, les données paramétrables dans le modèle, et les moyens possibles de validation des simulations.
- **Un modèle.** il décrit l'ensemble des fonctions qui simulent le comportement du système réel et génèrent les résultats sous forme de données de sortie.
- **Un simulateur.** Il organise les données d'entrées, exécute les fonctions du modèle et génère les données sorties résultats de la simulation.
- **Relation de modélisation.** Elle relie le système source et le modèle et définit la manière avec laquelle le système source devrait être représenté dans le modèle. un modèle est considéré valide si les données générées lors de la simulation sont en accord avec les données provenant de l'observation du système source.
- **Relation de simulation.** Elle relie le modèle et le simulateur et définit l'ensemble d'interfaces dont dispose le système lui permettant d'exécuter les fonctions du modèle.

1.2.2.4 Les types de modèles

On distingue généralement trois types de modèles : les modèles d'échelles, les modèles de conception et les modèles mathématiques.

- **Les modèles d'échelles** : Ils sont parmi les modèles les moins abstraits résultants d'une transformation d'échelle appliquée sur la réalité. On distingue les modèles iconiques qui sont des copies miniatures de la réalité comme les modèles d'architecture de dessins de bâtiments, et les modèles analogues dont la miniaturisation est accompagnée par une transformation de certaines propriétés comme les cartes utilisées par les géographes.
- **Les modèles de conception** : ces modèles sont à un niveau intermédiaire d'abstraction. Ils se concentrent sur la représentation des composants du système réel ainsi que leurs relations à travers souvent des diagrammes. Les modèles conceptuels de la méthode MERISE et les diagrammes du langage de modélisation UML sont des bons exemples de cette catégorie de modèles.
- **Les modèles mathématiques** : ils sont au niveau le plus élevé d'abstraction, ils sont les modèles les plus populaires et les plus utilisées. Ces modèles peuvent être classés aussi en plusieurs sous-classes.

Nous exposons ci-dessous trois types fondamentaux de modèles mathématiques largement connus en littérature [11] [12] [13].

- **Les modèles analytiques** : ce sont des modèles mathématiques écrits sous formes de fonctions mathématiques. Parce que le comportement de ces fonctions mathématiques est connu, ces modèles analytiques vont donner les mêmes solutions à chaque fois qu'on leur passe les mêmes paramètres. Il s'agit bien des modèles mathématiques déterministes continus dans le temps. Les équations différentielles ou d'équations différentielles partielles (EDP) sont exemples de fonctions qui constituent les briques élémentaires de ces modèles.
- **Les modèles probabilistes** : ce sont des modèles basés sur la théorie des probabilités. Ils incorporent des distributions de probabilités et des variables aléatoires pour représenter les événements incertains. Contrairement aux modèles déterministes qui donnent une solution unique, les modèles probabilistes donnent une distribution de probabilité comme solution. Il y a toujours un élément aléatoire qu'il faut prendre en compte. Les modèles à base de chaînes de Markov, de réseaux bayésiens sont des exemples de modèles probabilistes.
- **Les modèles à base de simulation** : Ils utilisent la simulation par ordinateur comme support ; la simulation peut se baser sur une combinaison des modèles y compris les modèles analytiques et probabilistes. Les modèles issus du domaine de l'intelligence artificielle sont des exemples marquants de modèles à base de simulation. Ces modèles

profitent de l'avancement technologique. Ils sont complexes en conception mais ils sont excellents pour la simulation des systèmes complexes.

Pour modéliser et simuler un cas particulier des systèmes complexes, une modélisation particulière a vu le jour qui considère les systèmes complexes comme des systèmes composés d'agents interactifs.

1.2.3 Les Systèmes multi-agents

1.2.3.1 Origine des SMA

Les systèmes multi-agent ont apporté une nouvelle vision pour étudier les systèmes complexes en mettant l'accent sur les interactions des composantes des systèmes. Dans la littérature, Les systèmes multi-agents est l'un des plus récents domaines de recherches en intelligence artificielle. Il a commencé au début des années 1990 avec Minsky [14], Ferber [15], comme une tentative d'améliorer les limites de l'intelligence artificielle classique. Les concepts théoriques des SMA s'intéressent à la modélisation des comportements humains dans le monde réel avec des notions mentales telles que les connaissances, les croyances, les intentions, les désirs, les choix et les engagements [16].

1.2.3.2 La notion d'agent

Il n'existe pas une définition unifiée de la notion d'agent. En fait, chaque auteur essaye de définir l'agent selon son angle de vue disciplinaire. Pour ne pas perdre le sens de la notion d'agent, nous nous limitons à deux définitions largement acceptées par la communauté de recherche et nous précisons la définition retenue dans notre travail.

L'auteur Jacques Ferber, dans son livre [15], a proposé la définition suivante "Un agent est une entité autonome, réelle ou abstraite, qui est capable d'agir sur elle-même et sur son environnement, qui, dans un univers multi-agents, peut communiquer avec d'autres agents, et dont le comportement est la conséquence de ses observations, de ses connaissances et des interactions avec les autres agents".

L'auteur Michael Wooldridge, dans son livre [17], a défini l'agent en écrivant "An agent is a computer system that is situated in some environment, and that is capable of autonomous action in this environment in order to meet its design objectives".

Les deux auteurs s'accordent sur l'autonomie comme principale caractéristique du concept d'agent. En fait, il s'agit de la caractéristique la plus universellement reconnue chez les chercheurs en systèmes multi-agents. Wooldridge met l'accent sur les objectifs individuels que

l'agent essaie d'atteindre en exécutant des actions autonomes. Il néglige la communication des agents tandis que Ferber la considère essentielle dans l'élaboration du comportement de l'agent. Les deux auteurs se rejoignent aussi sur la notion d'environnement dans lequel les agents se situent.

En nous inspirant de ces deux définitions, nous appellerons agent une composante physique ou logicielle :

1. Qui est autonome dans ses actions
2. Qui peut être réactive en sens qu'il perçoit son environnement et agit en réponse à sa perception.
3. Dont la perception de l'environnement est limitée.
4. Qui peut communiquer avec des humains ou d'autres agents
5. Qui possède des caractéristiques intrinsèques constituant son état interne
6. Qui peut évoluer au cours du temps
7. Qui peut être proactif dans le sens qu'il prend l'initiative et achève un comportement orienté (soit par des objectifs prédéfinis ou par des fonctions de satisfaction)

1.2.3.3 Un système multi-agents

Un système multi-agents est composé d'un ensemble d'agents qui évoluent dans un environnement, interagissent les uns avec les autres, agissent en exécutant des actions qui peuvent se répercuter sur l'environnement, établissent des relations d'amitié, de collaboration, de voisinage, de concurrence voire d'hostilité. Dans un système multi-agents, les agents prennent l'initiative de façon autonome et asynchrone. Le contrôle est théoriquement décentralisé, cela ne veut pas dire qu'une implémentation centralisée à base de système multi-agents n'est pas possible. Au contraire, tout agent peut être attribué un contrôle complet ou réduit dans un système multi-agents de telle sorte qu'il peut avoir un rôle central dans l'achèvement du comportement global du système. La Figure 4 illustre l'interaction entre un agent et son environnement ainsi qu'avec les autres agents.

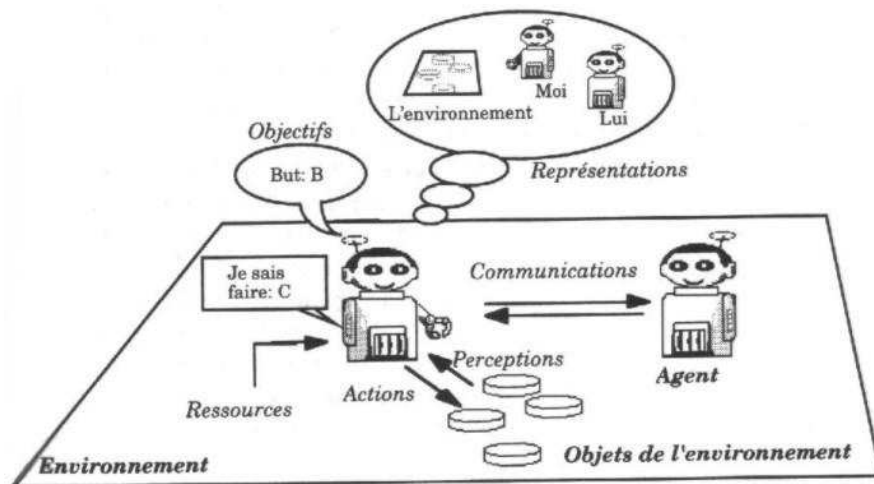


Figure 4 Interaction d'un agent avec son environnement et d'autres agents [Ferber [15]]

Les systèmes multi-agents sont des systèmes auto-organisés dont le comportement global est le résultat de l'émergence des comportements individuels des agents et des interactions entre agents du système.

1.2.3.4 Catégories d'agents

Deux principales catégories d'agents ont été largement étudiées par la communauté scientifique. Il s'agit bien des agents réactifs et agents cognitifs.

Les agents réactifs

Les agents réactifs sont définis à partir de règles de type "if then". Une règle définit une action qu'un agent peut exécuter si une condition est bien vérifiée. Une condition peut être par exemple un dépassement de seuil d'une donnée perçue par l'agent à travers son environnement ou bien à travers une communication avec d'autres agents. Autrement dit, Les agents réactifs peuvent représenter des comportements très simples de type stimulus-réponses qui ne résultent pas d'un raisonnement complexe, ni d'une réflexion autour des expériences passées. Le comportement de l'agent est donc simplifié à un ensemble de règles prédéfinies qui peuvent être exécutées en série comme en parallèle.

Vu la simplicité des règles de type 'if then', qui sont les briques élémentaires constitutifs du comportement des agents réactifs, ces derniers sont les plus faciles à concevoir et à développer. Les agents réactifs peuvent être utilisés pour la conception de systèmes complexes aux comportements simples comme les systèmes de simulation de fourmis ou d'insectes, les systèmes à base de robots ou les systèmes de pare-feu.

Les agents cognitifs

Les agents cognitifs ont des modèles détaillés de leur environnement. Des mémoires internes leur permettant d'utiliser les actions passées dans la résolution des problèmes courants. Les agents réfléchissent, pensent et mémorisent l'évolution de leur environnement. Les agents ne répondent pas immédiatement aux événements venants de l'extérieur. Leurs réponses résultent de raisonnements logiques prenant en considération les données perçues de l'environnement, les données communiquées par les autres agents, les expériences de l'agent et ses données intrinsèques. Il ne s'agit pas toujours de répondre à des stimuli extérieurs, les agents cognitifs peuvent prendre des décisions, établir et suivre des plans d'exécution pour atteindre leurs objectifs préalablement fixés.

La conception de raisonnement logique des agents cognitifs n'est pas aussi simple que la conception du comportement des agents réactifs. Le facteur derrière cette difficulté de conception, est que les données collectées par les agents doivent être transformées ou interprétées en objectifs, désirs et actions. Pour ce faire, des composantes de décision des agents –dites aussi d'interprétation- doivent être conçues. Selon le problème étudié, pour atteindre cette finalité, les chercheurs utilisent des méthodes probabilistes avancées à base d'apprentissage ou d'optimisation comme les réseaux de neurones, SVM, les réseaux bayésiens etc.

1.2.3.5 Architecture des agents

Pour implémenter et fabriquer des agents, des architectures ont été conçues. Nous présentons deux principales architectures communément reconnues par les spécialistes des SMA.

Architecture de subsumption

L'architecture de subsumption de Brooks [18] est probablement la plus populaire architecture réactive [19]. Il s'agit d'une architecture qui implémente les décisions comme une association de situations envers des actions et elle est basée sur le mécanisme de stimuli-réponses déclenché par les données perçues des capteurs. L'architecture de Brooks définit des couches de comportements qui sont connectées aux capteurs qui transmettent des données. Les agents à base d'architecture de subsumption perçoivent les conditions et agissent mais ils ne planifient pas. L'avantage de cette architecture est qu'elle fonctionne rapidement (i.e., une meilleure réponse mais elle manque de raisonnement) dans un environnement dynamique.

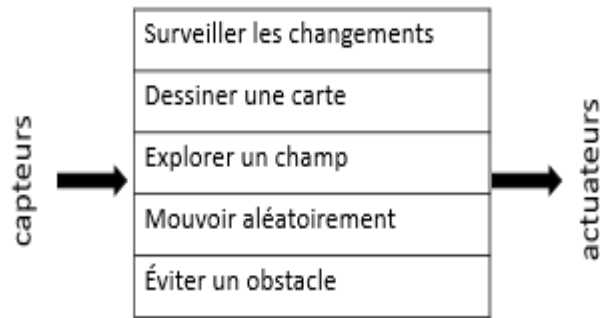


Figure 5 Principe de l'architecture de subsumption

La Figure 5 illustre l'architecture d'un agent robot explorateur. Les couches de l'architecture sont hiérarchisées de telle sorte que les comportements de bas niveau sont les moins abstraits tandis que les comportements de haut niveau sont les plus complexes. Par exemple, le comportement 'éviter un obstacle' est le plus en bas, le comportement 'Mouvoir aléatoirement' le suit en ordre ascendant vu que l'agent robot doit avoir l'habileté d'éviter un obstacle afin de pouvoir marcher effectivement.

Architecture BDI

L'architecture BDI (Belief, Desire, Intention) est probablement la plus populaire architecture [20]. Cette architecture était proposée par [21] comme une théorie de raisonnement humain pratique. Elle se base sur trois attitudes mentales qui sont les croyances, les désirs et les intentions :

- les **croyances** représentent l'information qu'un agent a sur son environnement qui peut être incomplète ou incorrecte. Chaque agent a une sorte de base de données contenant des représentations abstraites de l'environnement et des autres agents.
- Les **désirs** représentent les tâches possibles que l'agent peut exécuter, elles correspondent aux buts ou objectifs que l'agent pourrait achever. Autrement dit, les désirs correspondent tout à la fois à des visions, et des objectifs ou buts raisonnables.
- Les **intentions** représentent les désirs que l'agent s'est engagé d'achever et pour lesquelles il affecte des ressources. Pour réaliser de telles intentions, l'agent peut suivre des plans qui spécifient les pistes d'actions

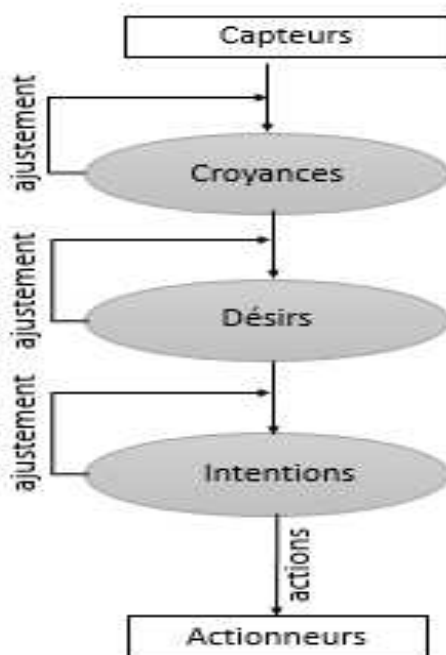


Figure 6 une architecture BDI

Un agent construit selon une architecture BDI (Figure 6) gère trois structures de données Croyances, désirs et intentions. L'agent capture des observations de l'environnement de façon continue à travers ses capteurs. Il ajuste ensuite ses croyances à base de nouvelles observations, il génère de nouveaux désires (tâches) sur la base de croyances ajustées, il sélectionne à partir des désires actifs un sous-ensemble qui formeront les intentions, finalement, l'agent sélectionne des actions à exécuter sur la base des intentions actuels de l'agent.

1.2.3.6 Différence entre agents et objets

Les objets et agents sont deux choses différentes, toutefois les personnes intéressés par la programmation orientée objet échouent de voir les nouveautés apportées par la notion d'agent. Cette vision ne serait pas surprenante quand de telles personnes réduisent les agents en propriétés et méthodes.

Les points suivants résument les différences principales entre l'approche orienté objet et l'approche orientée agents comme a été rapporté par Wooldridge dans son livre [17].

- Un objet est une entité qui encapsule des propriétés -dites état de l'objet- et des méthodes agissant sur ses propriétés. Un objet ne peut communiquer avec un autre qu'à travers le passage d'arguments. Un objet exécute sa propre méthode mais c'est un autre objet ou fonction indépendante qui en déclenche. L'objet contrôle son état interne mais il ne contrôle pas son déclenchement.

- Par opposition aux objets, les agents agissent de façon autonome. Même s'ils reçoivent des messages de déclenchement de certains comportements, les agents peuvent ne pas obéir surtout si cela peut leur éloigner de leurs objectifs envisagés. Les agents sont libres et choisissent les actions qu'ils désirent. Au contraire, lorsque des objets reçoivent des messages, des méthodes sont systématiquement exécutées.
- Les agents détiennent certaines qualités comme la flexibilité (réactivité, proactivité, sociabilité) et l'autonomie de comportement. Le standard de programmation orientée objet n'a absolument rien à dire autour de comment concevoir des systèmes intégrant ce genre de comportement. Cela ne veut pas dire qu'il est impossible. Bien au contraire, il est possible de développer des modèles orientés objets qui implémentent la notion d'autonomie, mais le point est de dire que cette notion d'autonomie n'est pas une partie intégrante du standard de la programmation orientée objet.
- Les objets d'une application orientée objets sont fondamentalement intégrés dans un seul Thread qui représente l'application. Un objet parmi les objets attend donc son rôle pour être exécuté en séquence. Les systèmes multi-agents sont conçus pour que chaque agent ait son propre Thread. Chaque agent s'exécute en parallèle aux autres agents. De ce fait, Les agents peuvent être entrés en situation de concurrence de coopération ou de coordination.

1.2.3.7 Interactions des agents

Communication via l'environnement

L'environnement peut jouer le rôle du canal de communication entre les agents. Le nombre de messages émis suivant une communication directe entre les agents du système est très réduit. Il s'agit d'une communication indirecte. Les agents agissent selon leur perception de l'état de l'environnement. En fait, avant d'agir, chaque agent perçoit l'environnement dont l'état courant est le résultat des actions parallèles préalablement effectués par des agents du système.

L'un des exemples de systèmes multi-agents marquants ayant utilisé la communication via le médium d'environnement est le système multi-agent MANTA développé par le chercheur Drogoul [22]. Le projet MANTA avait comme objectif la simulation d'une société de fourmis. Pour ce faire, des agents réactifs ont été utilisés pour représenter les fourmis qui coordonnaient uniquement à travers les phéromones qu'ils déposent sur le sol.

Communication via le tableau noir

La notion de tableau noir est un autre moyen pour permettre une communication indirecte entre les agents d'un système. Les systèmes à base de tableau noir [23] sont conçus autour de deux principales composantes 1) un ensemble d'entités relativement autonomes qui agissent en parallèle et qui partagent des informations. 2) un espace mémoire de stockage utilisé par les entités pour partager leur information.

Les entités agents agissent et communiquent des informations en les stockant dans l'espace mémoire commun, le tableau noir. Les entités demandeuses de l'information récupèrent cette information, agissent en se basant sur ce savoir acquis, et produisent ensuite de nouvelles informations qui sont stockées à leur tour dans le blackboard.

La communication entre les agents qu'elle soit via l'environnement ou via le tableau noir doit être instauré en suivant un mécanisme de concurrence approprié qui évite l'inter-blocage entre les agents lors de l'accès à l'information.

Communication via l'envoi de messages

Les agents peuvent interagir directement les uns avec les autres à travers un langage de communication spécial, dit langage de communication des agents. Ces langages de communication se basent principalement sur la théorie des actes de langues [24].

La communauté des chercheurs SMA s'est inspirée de cette théorie afin de développer des langages et protocoles de communication entre les agents. Le premier langage qui a repris largement la théorie des actes de langues est KQML (Knowledge Query and Manipulation Language) (Mayfield et al 1990). KQML a été développé au début des années 1990. Il est à la fois un langage et protocole d'échange d'information et de savoir. Actuellement, le langage de communication agent le plus utilisé et étudié est ACL (Agent Communication Language) [25] Ce dernier hérite de son prédécesseur KQML. Le langage ACL a été proposé par la foundation FIPA (Foundation for Intelligent Physical Agents). Il tend à devenir un langage de référence dans le domaine de communication entre les agents.

1.3. Conclusion

Au passage de ce chapitre nous avons introduit le contexte général de ce travail de recherche, nous avons ensuite exposé les notions relatives à l'aide à la décision, à la modélisation et la simulation, aux modèles et aux systèmes multi-agents. Le chapitre suivant sera consacré à l'approche automate cellulaire qui formera avec l'approche système multi-agents le cœur de notre approche de modélisation et de simulation.

CHAPITRE 2. AUTOMATE CELLULAIRE ET MODÉLISATION URBAINE

Le chapitre courant contient trois parties. La première partie présente les concepts de base de l'approche automate cellulaire. La deuxième partie présente la représentation mathématique de l'AC, sa diversité d'utilisation dans les domaines de recherche et les points d'appropriation de l'approche pour la modélisation urbaine. La dernière partie expose notre méthodologie qui permet le passage de la revue à la spécification de modèles d'AC suivi d'une discussion détaillée autour des choix préliminaires de conception préférés dans le cas de la thématique urbaine.

2.1. Contexte et objectif

L'approche régionale de modélisation urbaine considère la ville comme étant divisée en plusieurs zones administratives. Chaque zone regroupe des données sur l'infrastructure (distributions de l'occupation du sol, catégories de logements, prix de logements, etc) et sur la population (distributions de groupes socio-économiques et culturels, etc) provenant principalement des statistiques sur ces régions administratives. L'utilité d'une telle approche dans la recherche urbaine est limitée, à la lumière de l'effet négatif du dit inférence écologique qui construit des conclusions sur des individus à partir des résultats sur des unités régions. Comme le confirment beaucoup de travaux de recherche récents, il n'y a pas une baguette magique qui permet de transmuter des données agrégées sur des groupes en données – conclusions sur des individus.

Comme conséquence, l'approche structurelle qui considère les interactions socio-spatiales (à une échelle locale) comme facteurs de dynamiques urbaines, vient de dominer l'approche régionale. Cette nouvelle approche a été supportée par la théorie des systèmes complexes qui démontre clairement que l'erreur dans le processus d'inférence écologique provient de l'ignorance de deux facteurs de base. Le premier est l'hétérogénéité locale (qu'elle soit environnementale, sociale ou économique) qui affecte le comportement des acteurs urbains et le deuxième est l'interaction entre les acteurs lors de la prise de décision concernant la mobilité dans la ville.

Inspiré par ses vues d'un côté et l'avancement informatique de l'autre côté, une approche alternative à la modélisation urbaine, visant à surmonter les limites de la modélisation régionale, est apparue. Cette nouvelle approche adresse les composants les plus élémentaires constituant l'infrastructure urbaine et est implémenté dans le cadre des Automates Cellulaires. Ce cadre d'AC nécessite que l'infrastructure urbaine soit présentée par moyen d'une grille de cellules. Chaque cellule peut être dans un état parmi d'autres, cet état changer avec le temps ; les dynamiques urbaines sont déterminées par un ensemble de règles qui définissent l'état de chaque cellule au pas de temps suivant, en fonction de l'état de la cellule elle-même et les états des cellules voisines.

L'approche d'AC est une approche prometteuse qui a différentes implémentations dans divers domaines d'applications comme la biologie, la chimie, la physique et le traitement d'images. Cette diversité d'applications nous a laissé nous interroger sur les choix préliminaires de conception qui doivent être spécifiées avant de passer à la conception d'une application d'AC importe peu le domaine de recherche. L'investigation autour de cette question nous a conduit à l'élaboration du travail en cours dans lequel nous proposons une méthodologie facile à utiliser qui aidera les personnes intéressées (chercheurs, concepteurs, développeurs) à identifier les choix de conception préliminaires de leurs futures modèles d'AC [26]. Pour élaborer la spécification d'un modèle d'AC, le spécialiste doit lire et comprendre les travaux de recherches antérieures relatives à la fois au problème étudié et à l'approche AC utilisée. Une telle tâche de lecture et de compréhension risque de prendre un temps et effort énormes. C'est ici qu'apparaît l'utilité de notre méthodologie qui permet au spécialiste de concentrer sa réflexion sur la détermination des principales propriétés les plus communément spécifiées.

2.2. Concepts de base

Les automates cellulaires sont des systèmes dynamiques discrets dans lesquels l'espace et le temps sont respectivement divisés en cellules spatiales régulières et en un pas de temps discrets. Les états sont finis. Chaque cellule se comporte comme un automate d'états finis qui change l'état dans le temps en suivant un ensemble de règles de transition. Le comportement global du système est la combinaison des effets des comportements individuels de toutes les cellules. Un automate cellulaire se compose de cinq éléments de base qui sont les cellules, les états, le voisinage, la règle de transition, et le temps.

2.2.1 La cellule

La cellule est l'unité spatiale élémentaire dans un espace cellulaire. Les cellules dans un automate cellulaire sont disposées dans une tessellation spatiale. Une grille bidimensionnelle de cellules est la forme la plus connue d'un automate cellulaire. Cependant, d'autres arrangements, comme l'automate cellulaire à une ou trois dimensions, ont également été développés. L'arrangement en nid d'abeilles est un autre arrangement qui avait été utilisé dans la littérature.

2.2.2 L'état

Un état est un attribut de la cellule qui représente le groupe auquel appartient la cellule en question. L'ensemble des états est souvent fini et représente tous les groupes de cellules qui existent dans le système. Chaque cellule a un état à un moment particulier et elle peut se déplacer vers un autre état dans un prochain moment. Les cellules et leurs états associés à un moment précis définissent l'état du système à ce moment précis. L'état est souvent représenté par une variable simple. Par exemple, dans le jeu de Life comme illustré dans la Figure 7, il existe deux groupes de cellules: les cellules mortes et les cellules vivantes. Ainsi, l'état pourrait être représenté par une variable qui pourrait avoir deux valeurs $\{0,1\}$, zéro pour représenter des cellules mortes et un pour représenter des cellules vivantes.

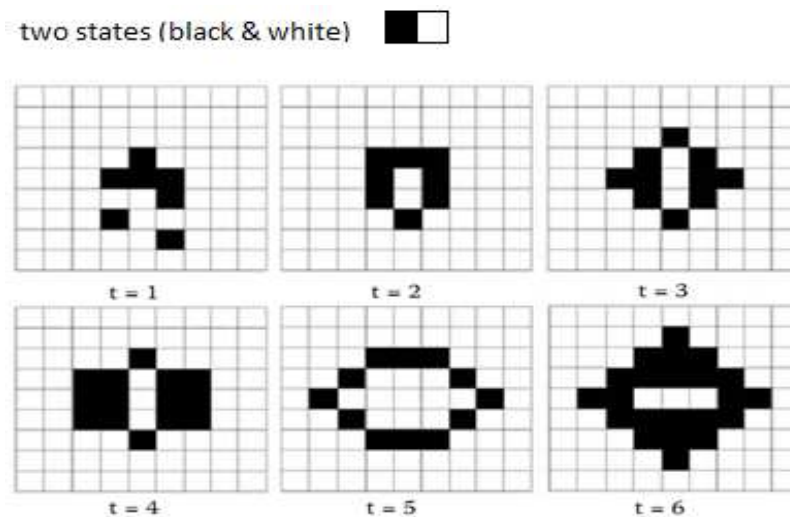


Figure 7 une simple simulation d'AC du "jeu de la vie" de Conway

2.2.3 Le voisinage

Le voisinage contient un ensemble de cellules qui forment avec la cellule en question une relation de voisinage. Selon le type d'arrangement de cellules, le voisinage change. Par exemple, dans un espace 2D, il existe deux principaux types de voisinage : le voisinage de

Moore et le voisinage de Von Neumann comme illustré dans la Figure 8. Le voisinage de Moore contient huit cellules qui sont disposées dans les directions nord-ouest, nord-est, sud-est et sud-ouest; Le voisinage de von Neumann contient quatre cellules, qui sont organisées en tant que voisins en nord, en sud, en est et en ouest de la cellule en question.

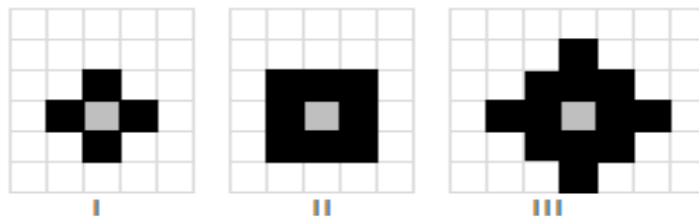


Figure 8 Les Types de voisinage (I) Von Neumann, (II) Moore, (IV) mélange de Moore & Von Neumann.

2.2.4 La règle de transition

La règle de transition définit à quel état la cellule en question transitera en fonction de son état actuel et des états de ses voisins. C'est la composante essentielle des automates cellulaires; Elle représente en particulier des algorithmes qui sont responsables de la conduite des changements de cellules d'un état à l'autre au fil du temps. Pour un automate cellulaire de base, les règles de transition sont uniformes, ce qui signifie qu'elles sont appliquées à toutes les cellules sans exception et qu'elles sont synchrones, ce qui signifie qu'elles sont appliquées simultanément à toutes les cellules du système. Waldo Tobler a présenté cinq modèles simples et abstraits de règles de transition [27]. Nous présentons les trois les plus réalistes en modélisation urbaine qui sont les modèles historiques, les modèles multi-variés et les modèles géographiques. La Figure 9 illustre leurs principes de fonctionnement. Le modèle historique utilise une série de données antérieures de la cellule concernée pour prédire son prochain état. Le modèle multi-varié utilise d'autres variables de la cellule concernée à l'instant t pour prédire son prochain état. Le modèle géographique comprend les voisins de la cellule concernée pour prédire son prochain état.

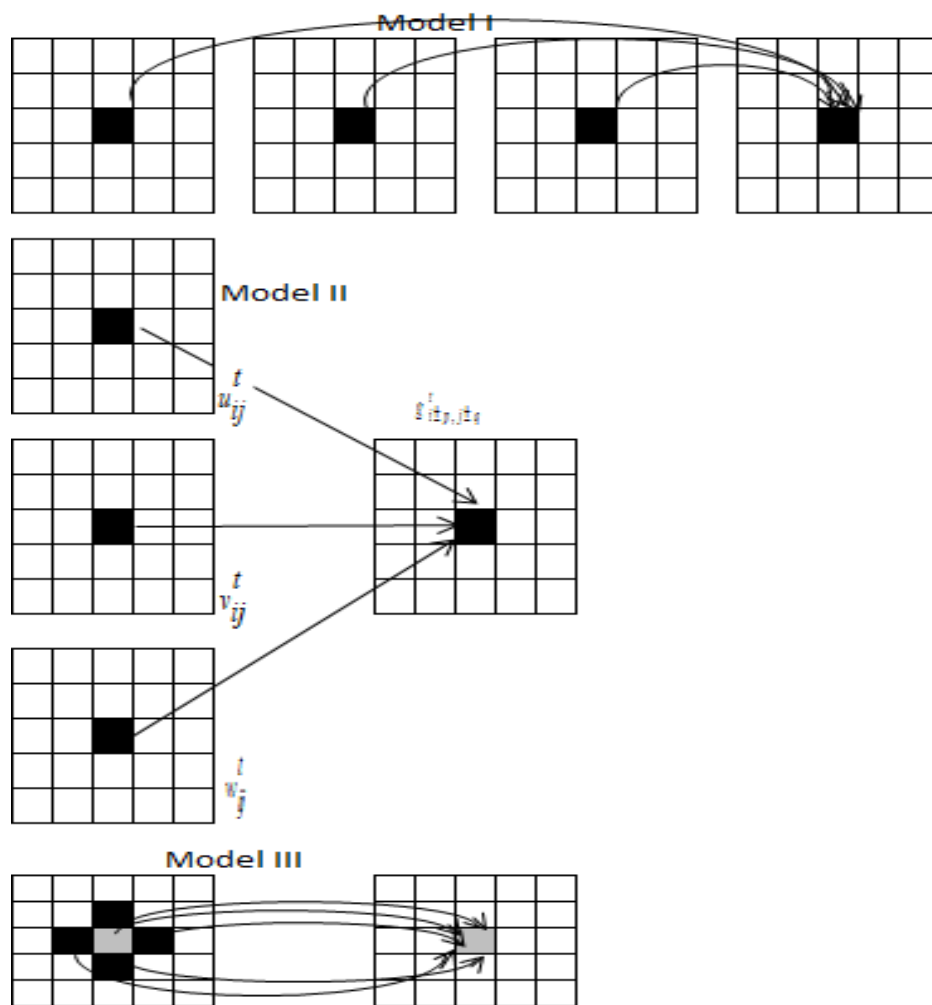


Figure 9 Modèles de règle de transition (adaptée depuis [27])

2.2.5 Le temps

Le temps définit le nombre d'itérations de la simulation. Il spécifie la durée de fonctionnement d'un automate cellulaire. Selon la définition des automates cellulaires, chacune de toutes les cellules peut mettre à jour ses états de façon synchrone à chaque itération au fil du temps. Le paramètre de durée est conventionnellement invariant dans les modèles d'automates cellulaires. Cependant, certains modèles ont libéré cette restriction et ont utilisé différentes durées pour différentes zones de l'espace cellulaire comme cela a été fait dans [28] où les auteurs ont utilisé pour leur modèle simulé deux échelles temporelles : une échelle mensuelle pour les zones basses et une échelle annuelle pour Les zones de hautes terres.

2.3. Notation mathématique et applications d'AC

2.3.1 Représentation mathématique

Soit $S_{C_{ij}}^t$ un état de la cellule C_{ij} à la position i,j au temps t . $S_{C_{ij}}^t$ est un état depuis un ensemble fini d'états $\{S_0, \dots, S_n\}$. Chaque cellule de l'espace cellulaire a un état à un temps spécifique. Pour calculer l'état $S_{C_{ij}}^{t+1}$ d'une cellule au time $t + 1$. Alors il faut utiliser une fonction ayant la forme suivante :

$$S_{C_{ij}}^{t+1} = g(S_{C_{ij}}^t, S_{N_{C_{ij}}}^t) \quad (1)$$

où $N_{C_{ij}}$ represent les cellules voisines de la cellule C_{ij} , $S_{N_{C_{ij}}}^t$ est un ensemble d'états de cellules voisines $N_{C_{ij}}$ au temps t , et g est la fonction de règles de transition. Si on considère la cellule elle-même comme membre du voisinage, alors l'équation peut être écrite comme suit:

$$S_{C_{ij}}^{t+1} = g(S_{N_{C_{ij}}}^t), \quad (2)$$

L'équation (2) est le moteur de l'automate cellulaire. En l'utilisant, une génération d'AC peut être créée à chaque nouvelle itération. Les fonctions de règles de transition sont souvent construites par des règles IF-THEN. Les règles de transition IF-THEN peuvent être exprimées avec une syntaxe verbale et compréhensive de cette façon :

IF Changement dans voisinage d'une cellule, **THEN** Changer la cellule à l'itération suivante.

Un exemple simple des règles IF-THEN sont les tris règles du jeu "Game of Life" de Conway:

- **SI** une cellule vivante a 2 ou 3 voisines dans son voisinage Moore
ALORS la cellule reste vivante dans l'itération $t+1$;
- **SI** une cellule vivante a moins de 2 voisines ou plus de 3 cellules voisines vivantes dans son voisinage de Moore
ALORS la cellule meurt dans l'itération $t+1$;
- **SI** une cellule morte a a 3 cellules vivantes dans son voisinage Moore
ALORS la cellule devient vivante dans l'itération $t+1$;

Grace à cette représentation mathématique de l'automate cellulaire, ce dernier peut être utilisé comme un Framework de conception et de simulation de systèmes dynamiques complexes en partant de règles claires et simples qui finiront par émerger des résultats globaux significatifs.

2.3.2 Domaines d'application

L'automate cellulaire est un outil flexible qui a été utilisé et peut être utilisé dans une grande variété de domaines. Dans cette section, nous décrivons certains modèles d'AC pour montrer sa diversité d'utilisation.

L'AC est un outil potentiel du champ de la physique. Il a montré un haut degré de précision dans la simulation et la prédiction des interactions N-Body [29] [30] [31]. Un des travaux qui a obtenu des résultats convenables qui sont presque identiques aux expérimentations du laboratoire est le modèle [32]. Les auteurs ont choisi pour la conception du modèle, des cellules hexagonales plutôt que des cellules carrées. Ils ont également choisi un voisinage circulaire avec un rayon de deux unités spatiales.

En chimie, l'automate cellulaire peut être utilisé à des fins de modélisation et simulation dans les disciplines de l'hydrodynamique et de la fluide dynamique [33] [34] [35]. Un sujet de recherche particulier est l'automate cellulaire de simulation de Gaz [36]. Le modèle sort au début avec des cellules carrées, mais après des cellules hexagonales ont été utilisées et montrées plus de précision et de réalisme vu qu'elles sont similaires à la logique de propagation du Gaz. Ce modèle a besoin d'une fonction de règle de transition spécialisée qui contient deux parties : la partie propagation responsable de la façon avec laquelle les particules meurent d'une cellule à l'autre et de la partie collision qui prévoit comment gérer la collision des particules.

En biologie, la bactérie *Myxobacteria* est un autre exemple d'application de l'automate cellulaire. Les myxobacterias sont un exemple de bactéries sociales qui vivent, nourrissent et se développent en coopération. Quand la nourriture manque les bactéries forment en ensemble un group appelé "body fruiting" pour raison d'économie d'énergie. Les chercheurs intéressés à la simulation de telles systèmes ont noté l'utilité des automates cellulaires [37] [38] [39]. Grâce à sa similarité avec le système de propagation de Gas, les auteurs [37] ont choisi de réutiliser le modèle « Gas Cellular Automata » et de l'adopter au système de propagation des bactéries. En effet, ils ont utilisé des règles de transition basées sur des algorithmes qui imitent la manière avec laquelle les bactéries bougent et se regroupent ensemble.

Le traitement de l'image était l'un des premières disciplines qui ont utilisé les automates Cellulaire [40] [41] [42] [43]. L'utilisation des automates cellulaires est évidente vu que les images numériques sont divisées en une forme cellulaire composée de petites cellules régulières

qui sont les pixels. En effet, chaque pixel a un état qui est sa couleur et a des pixels voisins selon le type de voisinage. Les pixels sont arrangés dans une grille rectangulaire comme des cellules carrées. En effet, le voisinage de type circulaire n'est pas préféré dans le traitement d'images. Les types de voisinage utilisables sont le voisinage rectangulaire, le voisinage de Moore et le voisinage Van-Neumann.

2.3.3 Appropriation d'AC pour la modélisation urbaine

Les automates cellulaires gagnent de plus en plus d'intérêt dans la modélisation urbaine. Cette section décrit leurs caractéristiques qui font d'eux un bon outil de modélisation urbaine.

Les AC sont spatiaux, ce qui signifie qu'ils sont convenables à représenter les problèmes spatiaux notamment les problèmes géographiques comme a été confirmé par les auteurs de [44]. Les problèmes spatiaux (comme la propagation des feux, la dynamique urbaine ou la croissance démographique) agissent en espace souvent de deux dimensions. En conséquence, une grille 2D est appropriée pour de tels problèmes. Les AC arrangés en trois dimensions ou en nid d'abeilles peuvent être utilisés pour représenter d'autres problèmes spatiaux comme la formation des galaxies, les villes 3D etc. Pourtant, les chercheurs préfèrent, quand il est possible, l'AC de deux dimensions vu sa simplicité lors de la construction du modèle.

Les AC sont des systèmes auto-organisés qui incrémentent leurs structures internes sans intervention externe et comme conséquence des structures émergentes à une échelle globale croient depuis des règles locales simples appliquées répétitivement à toutes les cellules de l'AC pendant un calendrier de temps. Cette caractéristique permet à l'AC d'être convenable à la modélisation urbaine. Le processus de la dynamique spatiale est local. Des règles de transition locales peuvent être justement appliquées à chaque unité spatiale de l'espace urbain. Ce qui permettra en conséquence d'émerger nouvelles structures spatiales.

Les AC sont des systèmes dynamiques (par opposition aux systèmes statiques ou transversaux qui ne dépendent pas du temps) qui dépendent du temps et leur résultat final est le calcul des processus d'ajustement pendant un calendrier du temps [45]. Étant des systèmes dynamiques, les automates cellulaires sont capables de modéliser des phénomènes urbains complexes et dynamiques comme la croissance urbaine qui peut être simulé itérativement dans des durées courtes ou longues de temps (e.g., mois, semestres, années, etc).

Les AC sont des systèmes dits en anglais "computational systems" qui consistent en un grand nombre de cellules discrètes localement interconnectées. Chaque cellule peut représenter une entité autonome et interactive (e.g., automate, machine, programme, agent etc) qui évolue

simultanément aux autres entités. C'est pour cette raison que les AC peuvent être vus comme des entités capables de supporter le calcul parallèle et les processus collectifs et coopératifs.

2.4. AC pour la modélisation urbaine

2.4.1 De la revue à la spécification du modèle AC

Avant de concevoir et de développer n'importe quel modèle d'AC, les chercheurs devraient faire des Choix Préliminaires de Conception qui constituent la spécification de leurs modèles d'AC attendus. En fait, ces choix sont le résultat de la compréhension du problème (phénomène à simuler) qui ne peut être atteinte qu'à travers une revue approfondie des travaux de recherches connexes au problème étudié. Une telle revue des travaux connexes qui a comme objectif la compréhension du problème étudié et la constitution des choix préliminaires de conception, est évident qu'elle nécessite un temps et un effort considérables vu la masse des travaux de recherche qu'il faut lire, comprendre et résumer. Une réflexion autour des caractéristiques communes d'AC dont la majorité de modèles doivent spécifier nous a permis d'extraire sept propriétés importantes. La Figure 10 illustre les propriétés extraites.

Ainsi, pour une revue intelligente et efficace, il est recommandé de fonder la revue sur ces sept propriétés importantes comme dans la Figure 10. Il s'agit bien des principales propriétés d'AC les plus importantes sur lesquelles le chercheur doit se concentrer lors de la spécification de son modèle d'AC.

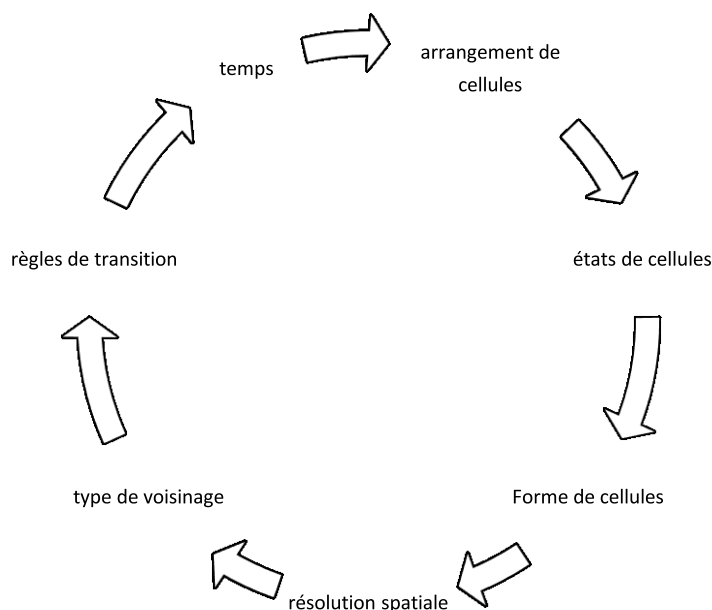


Figure 10 Cycle de spécification de modèles d'AC

En se focalisant sur ces propriétés, les personnes intéressés (chercheurs, concepteurs, développeurs) peuvent élaborer aisément les Choix Préliminaires de Conception de leurs modèles d'AC attendus. Pour ce faire, au fur et à mesure que le spécialiste fasse la revue, il essaye de trouver des réponses aux questions suivantes :

1. Quel arrangement choisir ?
2. Comment identifier les états de système d'AC ?
3. Quelle forme de cellules choisir ?
4. Quelle est la résolution spatiale appropriée ?
5. Quel type de voisinage choisir ?
6. Comment déterminer la durée de temps ?
7. Quel type de règles de transition choisir ?

Le Tableau 1 présente les principaux choix possibles des sept propriétés d'AC.

Tableau 1 Liste des choix préliminaires de conception basés sur les sept propriétés d'AC

Propriété d'AC	Choix
Arrangement	Arrangement en une, deux, trois dimensions, l'arrangement en nid d'abeilles.
Format de cellule	Carrée, rectangulaire, triangulaire, circulaire et hexagonale
états des cellules	Le problème étudié définit l'ensemble des états de l'occupation du sol.
Type de voisinage	Van-Neumann, Moore, Circulaire, Rectangulaire ou bien mélange de voisinages.
Règles de transition	Règles IF-THEN ou règles probabilistes
Temps	Le problème étudié définit le calendrier du temps.
Résolution spatiale	Les données géographiques disponibles définissent la résolution. e.g., 10 mètres carré

2.4.2 Une discussion des choix

Dans cette section, nous présentons une discussion autour des choix préliminaires de conception dans le contexte de la thématique urbaine.

2.4.2.1 Quel arrangement choisir?

La cellule est l'unité spatiale la plus élémentaire dans l'espace cellulaire et elle va représenter l'unité spatiale la plus élémentaire dans la zone urbaine étudiée. Les unités spatiales des zones urbaines sont universellement localisées par les coordonnées x et y dans les données géographiques e.g., les images satellites, images GIS etc. ceci est l'un des facteurs qui ont simplifié et privilégié l'utilisation de l'approche des automates cellulaires de deux dimensions. En effet, pour représenter l'occupation du sol dans la modélisation urbaine, la grille 2D est préférée. Dans la grille 3D, la troisième dimension peut être utilisée pour représenter la hauteur des meubles dans les modèles urbains. Cependant, ce dernier arrangement est rarement utilisé dans les pratiques de modélisation urbaine à cause de difficulté dans la conception et le développement du modèle. En plus aux coordonnées x et y qui positionnent avec une bonne précision toutes les unités spatiales dans la grille de l'AC, d'autres attributs peuvent être ajoutés et associés aux cellules comme l'état de la cellule.

2.4.2.2 Comment identifier les états de l'AC ?

L'état est un attribut parmi d'autres qui peuvent être associé à une unité spatiale de la zone étudiée. Il s'agit d'un attribut particulier qui représente le groupe auquel l'unité spatiale appartient. Dans la modélisation urbaine, les états des cellules représentent souvent les types de l'utilisation de la terre. Elles peuvent représenter l'occupation du sol comme zone verte, zone d'habitat, zone industrielle etc, ou bien n'importe quel spécifique types de l'occupation du sol ; ou bien représenter d'autres caractéristiques de la zone urbaine étudiée comme les catégories de ménages (personne unique, famille avec enfants etc) comme a été proposé par les auteurs de [46]. Le nombre d'états à considérer dans un modèle d'AC de modélisation urbaine n'est pas un consensus entre les chercheurs. Les auteurs de [47] ont utilisé cinq états qui sont : zone bâtie, zone d'eau, zone humide, forêts et espace verts, terres agricoles et ouvertes. Bien que d'autres ont utilisé plus ou moins d'états. Les auteurs de [48] par exemple ont utilisé une quinze d'états pour représenter l'occupation du sol.

2.4.2.3 Quelle forme de cellules choisir ?

La forme de la cellule est une importante spécification des modèles de l'AC. Dans la modélisation urbaine, les cellules de la forme carrée sont les plus convenables pour représenter

les unités spatiales. En effet, les chercheurs l'utilisent plus que les cellules hexagonales. En plus, le développement et la programmation des modèles d'AC ayant des cellules carrées est simple et facile en comparaison avec les AC hexagonaux. En revanche, certains chercheurs ont choisi d'utiliser les AC hexagonaux comme ont fait les auteurs de [48] qui ont développé l'application SpaCelle qui intègre à la fois les cellules carrées et hexagonales pour la simulation de la croissance urbaine dans la ville Rouen. Les auteurs de [49] ont développé aussi un AC hexagonal pour la modélisation et la prédiction la propagation des feux dans les forêts. Les AC triangulaire ne sont pas utilisés dans la modélisation urbaine.

2.4.2.4 Qu'est ce qui détermine la résolution spatiale ?

La résolution spatiale de l'AC dans le contexte de la modélisation urbaine est un autre facteur important qui est déterminé par les données de l'occupation du sol disponibles provenant essentiellement des images aériennes, satellitaires ou les données SIG. Si les données de l'occupation du sol disponibles sont d'une haute résolution alors le modèle d'AC peut avoir une grande précision. Plus la résolution spatiale est grande, meilleur est la précision des analyses spatiales. Par exemple, un AC avec une résolution spatiale de 10 mètres veut dire que toutes les cellules peuvent représenter un objet ou une partie d'objets qui a une taille inférieure à 10 mètres carrés. Brièvement, la résolution spatiale permet de comprendre combien une cellule peut représenter spatialement en terre. Ce sont les objectifs des modèles urbains qui définissent quelle résolution spatiale à utiliser ? Par exemple, les auteurs de [50] ont utilisé une résolution de dix mètres carrés pour la modélisation et la simulation de la mobilité résidentielle à une courte durée de dix ans. Les objectifs du modèle étaient d'identifier et représenter les logements i.e., appartement louée, appartement acheté, maison louée et maison achetée dans la grille de l'AC. C'est pour cela que de telle résolution spatiale apparait rationnelle pour de tels objectifs. Si un modèle d'AC peut utiliser une résolution spatiale très fine, il gagnera encore plus de précision lors de l'analyse des résultats de simulation.

2.4.2.5 Quel type de voisinage choisir ?

Les voisinages de Moore et Van-Neumann ont été largement utilisés. Il s'agit des voisinages les plus mentionnés dans le cas de la modélisation urbaine. Ces types de voisinages définissent les voisins comme les cellules qui sont immédiatement adjacentes à la cellule en question. Ils sont fondés sous la règle qui dit n'importe quel changement dans l'état de la cellule doit être local.

Les chercheurs ont étendu cette règle de telle manière que les voisins peuvent être localisés dans une certaine distance de la cellule concernée. Cette règle est dite en anglais "action-at-a-distance". Selon la distance, l'exploration d'une zone urbaine peut couvrir un district, une

commune, une ville etc. Par exemple, les auteurs de [44] ont défini un voisinage composé de 113 cellules dans un cercle ayant un rayon de six cellules. Pour modéliser et simuler une ville, les auteurs de [46] ont utilisé un voisinage ayant un rayon de 500 mètres. L'auteur de [51] a utilisé un voisinage rectangulaire pendant la modélisation et la simulation de développement urbain d'une région de croissance rapide en Chine. L'auteur a utilisé un rectangle de 5x5, qui inclut 120 cellules autour de la cellule centrale.

2.4.2.6 Comment déterminer le temps ?

Le temps définit le nombre d'itérations d'une simulation. Il peut être négligé en cas des modèles statiques ou transversaux qui s'exécute au plus en une seule itération. Cependant, les modèles dynamiques itèrent plus qu'une seule itération de simulation. Il y a besoin alors de spécifier le temps qui représente le nombre d'itérations. Ce nombre diffère d'une application à l'autre. Par exemple, dans le travail [46], le temps a été court, il est égal à 10 année de simulation de la mobilité résidentielle dans une ville allemande. Dans le travail [52], le temps est long, il est égal à 50 années de simulation de la mobilité résidentielle et le choix de résidence dans un district Leeds en Royaume Unie.

2.4.2.7 Quelle règle de transition utiliser ?

Les règles de transition sont le Coeur de l'AC. Elles représentent comment le processus modélisé fonctionne. Particulièrement, elle représente les algorithmes qui sont responsable de piloter le changement de cellules d'un état à un autre au cours du temps. Différentes approches ont été utilisé pour la conception des règles de transition des modèles urbains à base d'AC. Ces approches peuvent être classées principalement en deux catégories : l'approche IF-THEN et l'approche probabiliste.

L'approche IF-THEN utilise des règles simples qui sont implémentées avec des conditions e.g., if elseif else. Par exemple, les auteurs de [53] ont utilisé une simple règle dans leur modèle urbain de croissance urbaine dans lequel une cellule vacante peut être converti en cellule occupée si elle est entourée dans son voisinage par une cellule occupée. Malgré la simplicité du modèle, si on combine un grand nombre de simples règles "IF", on peut construire un très complexe AC qui peut potentiellement simuler le comportement du système urbain. Ceci était l'idée derrière beaucoup de travaux comme le travail de l'application SpaCelle [48] dans lequel les auteurs ont défini une dizaine de règles de transition pour la modélisation de la croissance urbaine de la ville Rouen en France.

L'approche probabiliste est basée sur la distribution des probabilités. Elle est devenue une méthode standard dans le développement des modèles qui essayent de prédire des choix

individuels parmi un ensemble fini d'alternatives [54]. En effet, chaque cellule va transiter d'un état à un autre avec une probabilité de transition. Plus précisément, pour chaque cellule, les probabilités de transition à tous les états du système sont calculées et ensuite la cellule transite vers l'état le plus probable. Si au moins deux états ont des probabilités de transition égales alors la cellule peut transiter vers un état choisi de façon aléatoire ou bien selon un autre algorithme qui choisit le meilleur état. Un exemple de cette approche est le travail [55]. Cette approche est souvent utilisée en combinant l'approche automate cellulaire avec les chaînes de Markov afin de bénéficier des avantages complémentaires des deux approches. Les auteurs de [56] ont rapporté qu'une approche combinant l'AC et les chaînes de Markov bénéficiant des potentiels des deux méthodes sera une approche privilégiée. L'automate cellulaire représente la distribution spatiale de la carte de l'occupation du sol. Et en dessus, les chaînes de Markov prédisent le taux total de changement en occupation du sol depuis les changements antérieurs.

2.5. Conclusion

Le travail proposé a introduit l'approche automate cellulaire, sa diversité d'utilisation dans plusieurs disciplines et son potentiel particulièrement pour la modélisation urbaine. Nous avons ensuite proposé une méthodologie d'élaboration de spécification de modèles d'AC. La méthodologie est le résultat d'une réflexion autour des caractéristiques les plus importantes d'AC que la majorité de modèles d'AC spécifient importe peu le domaine d'application. En appliquant cette méthodologie sur la thématique urbaine, nous avons mené une discussion autour des choix préliminaires préférés lors de la conception de modèles urbains à base d'automate cellulaire.

CHAPITRE 3. MODÈLE INFORMATIQUE DE MOBILITÉ RÉSIDENTIELLE

Le chapitre courant présente notre modèle de simulation de mobilité résidentielle [55]. Nous présentons l'intérêt de la simulation ainsi que les approches principales utilisées pour la modélisation de la mobilité résidentielle. Nous décrivons ensuite le contexte, l'hypothèse de fonctionnement, l'objectif de notre modèle et l'approche utilisée. Nous terminons le chapitre par une description détaillée du modèle, ses composants, son origine et ses spécificités.

3.1. Intérêts de la simulation de la mobilité résidentielle

La mobilité résidentielle est un phénomène urbain ayant été le sujet de recherche dans plusieurs disciplines à commencer par la sociologie, la démographie, la géographie, l'aménagement et l'urbanisme. Il se caractérise par des mouvances résidentielles, individuelles (décision de déménager et choix de logement) et agrégées (flux d'habitants) d'une population urbaine. La mobilité résidentielle s'intéresse principalement aux mobilités intra-urbaines qui s'effectuent au sein d'une agglomération urbaine, sans tenir compte des mobilités sur de plus longues distances (exemple de mobilités interurbaines).

Les études de la mobilité résidentielle s'attribuent entre autres l'un des objectifs suivants : 1) comprendre les choix résidentiels individuels et agrégés des habitants de la ville 2) étudier les structures spatiales résultantes des choix résidentiels de la population 3) anticiper et prédire les dynamiques résidentiels 4) tester les évolutions possibles face à des modifications de l'infrastructure tel que l'insertion de zone constructible, zones industrielles etc 5) répondre aux besoins de la population en terme d'habitat, d'infrastructure de transport et d'équipement.

Les études conventionnelles de mobilité résidentielle effectuées par les institutions étatiques (comme le Haut-Commissariat au Plan (HCP) au Maroc) sont importantes. Elles permettent de quantifier le phénomène de mobilité résidentielle, d'éclairer ses causes et effets présents. Cependant, les décisions et actions urbaines dérivées de ces études ne peuvent être que graduels ou progressives vu qu'elles sont une réaction à un fait urbain présent. L'état actuel de la question montre que les études conventionnelles ne peuvent pas seules atteindre les objectifs (3-4-5) vu que ces objectifs exigent des capacités de prédiction et de simulation qui leur font défaut.

Les enjeux de développement environnemental et durable des villes, les avancées dans les sciences de l'ordinateur ont permis la création d'un nouveau mouvement de modélisation et de simulation des dynamiques urbaines. Ce nouveau mouvement de modélisation et de simulation des dynamiques urbaines s'intéresse au développement de modèles informatiques de simulation qui exploitent les données sur la population et l'infrastructure urbaine, prédisent les dynamiques mutuelles de la population et de l'infrastructure et analysent les résultats de la simulation en vue d'une compréhension du système urbain et aide à la décision.

3.2. Approches de modélisation urbaine

La modélisation et la simulation des dynamiques urbaines, notamment la mobilité résidentielle, a été marquée par l'utilisation de plusieurs approches. Nous présentons quatre principales approches de modélisation.

3.2.1 L'approche régionale

L'approche régionale de modélisation urbaine est une approche issue des sciences économiques. Elle date des années soixante et soixante-dix. Cette approche considère la ville comme divisée en plusieurs zones administratives. Chaque zone regroupe des données sur l'infrastructure (distributions de l'occupation du sol, catégories de logements, prix de logements etc) et sur la population (distributions de groupes socio-économiques et culturels etc) provenant principalement des statistiques sur ces zones administratives. Ces zones constituent les unités élémentaires des modèles régionaux qui essaient de gérer les flux entre zones. Les objets échangés peuvent être une population, une marchandise, des capitaux etc. Les zones sont pondérées par des poids qui dépendent de leurs grandeurs.

Le nombre de paramètres d'un modèle régional typique est d'environ cent à mille paramètres. Un des modèles les plus élaborés est le modèle de la ville d'Amsterdam. Dans le Framework de ce modèle, la ville a été découpée en vingt zones et elle distingue onze types de logement et vingt-quatre types de ménages ayant quatre différentes tailles. La décision de changement de logement des ménages dépend de l'âge du chef de ménage (la variable âge distingue quatre catégories d'âge de cinq ans de différence) et du nombre de membres du ménage (sept groupes ont été distingués). Le modèle contient ainsi environ mille cinq cent variables représentant des événements démographiques, résidentiels et d'emploi [57].

Les modèles régionaux, suivent une approche descendante (top-down), pour étudier les systèmes complexes. Dans leurs Framework, un système urbain se développe et il est représenté par un nombre prédéterminé de composants. Ce développement intrinsèque du système urbain

ne permet pas de modéliser les phénomènes spatiaux qui sont accompagnés par des changements dans les périphéries des zones ou bien par l'émergence de nouvelles zones ayant différentes propriétés de celles de régions originelles. De ce fait, ces modèles régionaux sont inappropriés pour la modélisation des déplacements résidentiels accompagnés par une croissance spatiale dans les périphéries des espaces urbains.

3.2.2 L'approche statistique

L'approche statistique repose sur l'analyse et l'exploitation des recensements généraux de population et d'enquêtes ménages. Cette approche tente de mesurer les phénomènes urbains (comme la mobilité résidentielle, la croissance urbaine, l'urbanisation etc), de décrire l'évolution de ces phénomènes à des échelles spatio-temporelles, et de préparer des tableaux de croisement par exemple les comportements de mobilités des ménages et les caractéristiques du logement (localisation, type d'habitat, statut d'occupation) avec celles des individus et des ménages (âge, profession, niveau de revenu, etc.) [2].

3.2.3 L'approche Automate cellulaire

L'approche automate cellulaire est une approche ascendante. Elle divise l'espace urbaine en une grille de cellules. Chaque cellule a un état parmi un ensemble fini d'états du système et les états futurs dépendent des règles de transition basées sur un voisinage spatio-temporel local. Le système est homogène dans le sens que l'ensemble d'états est le même pour chaque cellule et les mêmes règles de transition sont appliquées sur chaque cellule. Le temps avance en pas discret et l'application des règles de transition sur l'ensemble des cellules peut être synchrone ou asynchrone [58].

Les modèles d'AC conventionnels utilisaient des règles à base de voisinage à portée locale. Les applications nouvelles des modèles d'AC se libèrent de plus en plus de cette spécificité. Ils utilisent des règles dont le voisinage est défini par une distance à la cellule concernée [46]. Par exemple, dans une ville, lors de la recherche d'un nouveau logement, l'exploration d'un ménage peut être réalisée dans le rayon de son actuel logement. Ce rayon peut couvrir un district, un quartier ou bien une ville.

Les modèles d'AC utilisent principalement soit des règles de transition IF-THEN ou bien des règles de transition probabilistes. L'approche IF-THEN consiste à utiliser des règles simples implémentées sous formes de conditions pour modéliser les dynamiques du système [59]. Cette approche, d'après la littérature, est la moins utilisée dans le temps contemporain en modélisation urbaine. L'approche probabiliste, par contre, s'impose de plus en plus en travaux

de modélisation des dynamiques spatiales. Les modèles de chaîne de Markov incorporés comme sous-modèles aux modèles d'AC constituent un exemple de modèles qui instaurent des règles de transition probabilistes [60]. Les auteurs de [56] ont rapporté qu'une approche combinant l'AC et les chaînes de Markov bénéficiant des potentiels des deux méthodes est une approche privilégiée. L'automate cellulaire représente la distribution spatiale de l'occupation du sol d'un espace urbain. Et en dessus, les chaînes de Markov prédisent le taux total de changement de l'occupation du sol depuis les changements antérieurs

Les techniques de modélisation cellulaire constituent le noyau de beaucoup de modèles de dynamiques spatiales. L'utilisation de ces techniques pour la modélisation des processus géographique date des années quatre-vingt-dix. Des modèles AC avancés existent actuellement pour la modélisation et la simulation des dynamiques spatiales [61], des systèmes d'évacuation [62], des dynamiques des bassins hydrauliques [63], de diffusion des feux de forêts [64]. De façon particulière, ces techniques cellulaires ont aussi contribué à la modélisation et la simulation de la mobilité résidentielle. Parmi les premiers travaux théoriques qui ont simulé les déplacements résidentiels des individus dans un espace urbain on trouve les travaux de James M. Sadoka et les travaux de Thomas Schelling comme rapporté dans [58]. Les deux auteurs ont conçu un espace cellulaire habité par une population appartenant à deux groupes sociaux et ils ont essayé ensuite suivant leurs propres modèles de règles de transition de simuler manuellement les déplacements résidentiels des individus sur l'espace cellulaire.

Les deux modèles sont très simples en construction mais ils inspirent les chercheurs en modélisation et simulation de mobilité résidentielle [65] [66] [67]. Ces derniers modèles cités se rejoignent sur l'idée de conception de Sadoka et Schelling qui permet d'un côté, de placer chaque entité individuelle, qui peut être soit un individu ou un ménage, dans une cellule qui sert de logement- de l'automate cellulaire et de l'autre côté, d'utiliser les règles de transition comme proxy pour déclencher la prise de décision des entités individuelles. Par exemple, dans le travail [66] un modèle de simulation de mobilité résidentielle à base d'automate cellulaire a été conçu. La population est organisée en ménages individuels dont chacun occupe une cellule de l'automate qui représente le logement habité. Les règles de transition du modèle AC permettent de gouverner les ménages dans leurs décisions de changement de logement. Les dynamiques résidentielles émergentes sont générées de l'interaction des changements dans la structure sociale des ménages et l'influence positive ou négative du voisinage. Cet exemple éclaire bien comment les règles de transition peuvent être utilisés comme intermédiaire entre l'automate cellulaire qui représente la ville étudiée et la population qui y habite.

Les efforts de modélisation, utilisant principalement l'approche automate cellulaire, pour la modélisation des dynamiques spatiales résultantes en plus des décisions des acteurs urbains, réussissent comme le démontre le travail [66]. Cependant, cette méthode cellulaire réussit uniquement si l'unité d'analyse est en harmonie avec l'arrangement cellulaire utilisé, les décisions des acteurs urbains sont au même niveau d'organisation et le voisinage local affecte les différents acteurs avec une simple et uniforme façon. Quand les acteurs ne sont pas liés aux localisations à la manière intrinsèque des cellules de l'automate cellulaire, les relations de voisinage de l'automate cellulaire conventionnel ne peuvent pas refléter les relations de voisinage des acteurs. La solution à ce problème dépend des techniques qui utilisent des règles de transition non uniformes et qui peuvent changer dynamiquement les configurations des connexions des cellules. Parce que ces techniques dépassent largement les capacités des modèles d'AC conventionnels, les méthodes d'AC conventionnels ne peuvent pas être largement adaptées à la modélisation des dynamiques urbaines. Un modèle de dynamique urbaine peut avoir besoin de multiples acteurs urbains arrangés en espace, des agents arrangés à différentes échelles d'organisations (e.g., population, gestionnaires urbains), ou bien des agents faisant le contrôle de certaines parties d'espace urbain.

En résumé, les techniques d'AC ont démontré clairement leur capacité pour la modélisation des aspects spatiaux des dynamiques urbaines, pourtant, elles confrontent des challenges lors de la considération des décisions des acteurs urbains surtout quand ces acteurs s'arrangent à différentes échelles d'organisations. Pour remédier à ces challenges il est nécessaire d'implémenter des ensembles de règles de transition complexes et multi-échelles qui s'appliquent sur différents groupes de cellules. Même si cette solution est possible, les déviations par rapport à l'AC générique vont se faire au détriment d'abandonner les avantages potentiels de l'AC générique. En particulier, Afin d'assurer la réutilisation, et l'extensibilité dans d'autres applications et domaines par l'intermédiaire de plateforme de modélisation et de simulation, il est nécessaire que la forme de l'AC préserve autant de caractéristiques de modèles génériques que possible.

3.2.4 L'approche multi-agents

Alors que l'approche automate cellulaire se concentre sur la représentation de l'espace et sa transition, l'approche multi-agents s'intéresse à la représentation des acteurs vivants dits agents, leurs actions et interactions dans le système. Les agents sont les éléments fondamentaux dans les modèles multi-agent. Plusieurs caractéristiques définissent les agents : ils sont autonomes ; ils partagent un environnement à travers la communication et l'interaction ; et ils prennent des

décisions qui lient comportement à l'environnement. Les agents ont été utilisés pour représenter diverses entités comme les atomes, les cellules biologiques, les animaux, les robots, les humains et les organisations. L'autonomie signifie que les agents agissent et interagissent avec leur totale volonté, même dans le cas où ces agents subissent une dominance depuis une entité externe, ces agents n'exécutent pas des actions que s'ils les ont choisies. Wooldridge [17] définit les agents intelligents comme étant capables d'agir avec flexibilité, ce qui implique que les agents sont orientés objectifs dans leurs actions et qu'ils sont capables d'interagir avec d'autres agents et un environnement commun, qui est tout chose en dehors des agents. Dans un contexte de modélisation urbaine, un environnement partagé peut être un espace urbain où les actions d'un agent peuvent affecter celles des autres. Il peut être aussi un marché foncier à travers lequel les agents achètent et vendent des logements et terres.

Les agents doivent exécuter des actions qui résultent d'un processus de réflexion qui relie leurs objectifs à l'environnement à travers leur comportement. Ce processus de réflexion, dit aussi modèle de cognition, peut aller de simples décisions de type stimulus-réponse jusqu'au point où les agents deviennent proactives et prennent des décisions. Un agent autonome a besoin, au minimum, de percevoir son environnement et réagir en conséquence aux connaissances perçues. La réaction peut être considérée comme un modèle cognitive, dans un sens où il s'agit de réponse d'agents aux changements. Certains modèles de cognition vont au-delà de la réaction, ils considèrent les agents comme possesseurs de rationalité et capacité analytique parfaites qui leur permettent de résoudre les problèmes complexes d'optimisation mathématiques. Ces modèles essayant de rendre les agents parfaitement rationnels se contredisent par les preuves expérimentales. Il est une question ouverte si ces modèles de rationalité parfaite sont appropriés aux modèles urbaines multi-agents, sachant les interdépendances et interrelations dans ses systèmes. La reconnaissance difficile de l'environnement complexe dans lequel la prise de décision humaine se produit a entraîné un mouvement vers une nouvelle variante de modèles agent ayant une rationalité réduite. Au lieu d'implémenter une solution qui prédit complètement les états futurs du système dont ils font partie, les agents utilisent des méthodes heuristiques de classification et de prédiction. Les réseaux bayésiens [68], les réseaux de neurones [69], les algorithmes génétiques [70] sont des exemples de méthodes ayant été utilisées pour la conception de modèles de réflexion des agents dans certains systèmes urbains.

Les applications de l'approche agent pour la conception de systèmes complexes ne sont pas à démontrer, toutefois, les applications de mobilité résidentielle conçues uniquement à base de l'approche agent ne sont pas à la hauteur voulue vu que l'approche agent ne s'intéresse pas à

l'origine à la modélisation des environnements spatiaux. En revanche, il existe des travaux de modélisation de modélisation résidentielle qui ont opté pour l'utilisation principale de l'approche agent. Ces modèles agent de mobilité résidentielle, n'intègre pas l'espace urbain comme environnement, ils n'ont pas de représentation spatiale comme rapporté par [46]. Pour représenter l'environnement des agents, Ces modèles agent incorporent des modèles de marché foncier. Le travail de [71] illustre ce genre de modèles à travers un modèle de simulation multi-agents de déplacements de la population dans un espace urbain mono-centrique. Le modèle n'incorpore pas l'espace urbain dans lequel la population se déplace, il utilise une grille réduite de deux dimensions, qui permet de différencier les unités logements par leur distance au centre de la ville, ainsi que les aménités par localisation.

Ces modèles peu rencontrés en littérature, décrivaient une piste de recherche qui commence à être oublié, dans le temps contemporain, pour deux raisons principales. La première raison est que ces modèles n'incluent pas l'information spatiale de la ville comme les unités équipements, hôpitaux, écoles etc, et. La deuxième raison, même s'il s'agit de modèles agents, ils ne traitent pas les comportements résidentiels individuels notamment la décision de changement de logement, et la décision de choix de logement. Ces travaux de recherches, instrumentalisant l'approche agent dans la modélisation de mobilité résidentielle, démontrent d'un côté, que l'approche agent est utile pour la conception des acteurs urbains notamment les ménages mais de l'autre côté, ils éclairent bien que cette approche agent ne dispose pas de moyens pour représenter l'espace urbain lieu des interactions des agents humains.

3.2.5 L'approche d'alliance de SMA-AC

L'approche d'alliance de SMA et AC est une approche récente en modélisation des dynamiques urbaines qui se caractérisent à la fois par les dynamiques sociétales et spatiales. Malgré sa nouveauté, elle possède dans son répertoire diverses applications en modélisation urbaine vu qu'elle est une approche émergente de deux approches ayant atteintes chacune une grande maturité dans les domaines de modélisation et de simulation des systèmes complexes. Torrens dans [72] rapporte que cette nouvelle approche est utile pour le développement des outils d'aide à la planification, avec une capacité de simuler les ménages individuels et les zones bâties d'une manière réaliste, dynamique et flexible. Ce sont les limites des approches préalablement présentés qui causent le mouvement vers cette nouvelle approche de modélisation et de simulation. Le manque de représentation dynamique dans les simulations urbaines, le manque de détail dans les représentations spatio-socio-économiques et la non inclusion des processus

ascendants dans les systèmes complexes sont les importants inconvénients des modèles régionaux conventionnels [72].

Les modèles régionaux opèrent à un niveau très agrégat. En effet, quand l'hétérogénéité et l'interaction à un niveau local sont importantes dans les dynamiques urbaines, les modèles régionaux vont avoir une capacité d'explication très réduites de ces dynamiques. Les modèles statistiques offrent une vue sophistiquée des indicateurs de décisions à plusieurs dimensions. Toutefois, ces modèles condensent les informations dans des paramètres estimés qui représentent les effets moyens des données disponibles. En effet, ces modèles peuvent être utiles pour la projection des dynamiques et interactions spatiales uniquement pour les phénomènes garantissant stationnarité et uniformité dans l'espace et le temps. Bien que Les modèles cellulaires offrent une plus grande flexibilité pour la représentation des dynamiques spatio-temporelles mais, ils disposent de moyens réduits pour représenter les acteurs urbains. Les modèles cellulaires ne réussissent pas à modéliser les acteurs urbains que lorsque ces derniers sont arrangés de la même manière des cellules de l'automate cellulaire. Aucune des approches précédentes ne permet de représenter efficacement les différentes décisions des acteurs urbains qui se caractérisent par l'autonomie, l'hétérogénéité et la décentralisation à l'exception de l'approche multi-agent. Or cette dernière, ne dispose pas de moyens pour représenter l'espace urbain lieu des interactions des agents humains.

L'approche alliance de SMA-AC remédie à ces limites que présentent chacune des approches précédentes. En particulier, cette approche d'alliance a une grande capacité pour la modélisation des dynamiques urbaines résultantes des interactions des entités humaines et spatiales. L'approche bénéficie des avantages complémentaires qu'apporte les deux approches SMA et AC. L'approche SMA peut représenter les acteurs urbains, leurs comportements et leurs interactions entre eux et avec leur environnement. L'approche AC peut représenter les unités spatiales comme les maisons, appartements, écoles, etc de l'espace urbain lieu de l'interaction des acteurs humains. L'approche SMA-AC bénéficie en plus des fondements théoriques qu'apportent les deux approches. Dans le Framework de SMA, les dynamiques spatiales, le développement de zones bâties et la création de logements vacants sont considérées comme des dynamiques émergentes des actions des acteurs urbains notamment la population qui habite dans la région urbaine ; Dans le Framework de l'AC, les dynamiques spatiales sont considérées comme des dynamiques résultantes des concepts statistiques de règles de transitions (exemple des concepts de chaîne de Markov) appliqués sur une série de cartes cellulaires de la région en cours d'étude. Ces deux fondements théoriques permettent de voir la ville dans ces deux aspects

sociétaux et spatiaux et peuvent apporter plus de représentativité aux processus intrinsèques qui régissent les zones urbaines.

La nouvelle approche d'alliance SMA-AC crée une nouvelle motivation pour la modélisation et la simulation de la mobilité résidentielle. Même si les modèles urbains notamment ceux de la mobilité résidentielle ne sont pas simples en conception et développement, les chercheurs se libèrent de plus en plus des approches précédentes et s'inscrivent de façon croissante dans ce nouveau cadre de fusion des approches AC et SMA. Parmi les modèles les plus marquants on trouve [65] [46] [73]. Ces modèles de mobilité résidentielle reposent généralement sur des cadres théoriques similaires (avec bien évidemment des traits spécifiques à chaque modèle) issus essentiellement des avancées en sciences sociales et économiques. Ces Framework théoriques représentent les dynamiques résidentielles selon une approche ascendante dite l'approche « stress-résistance », qui voit les dynamiques résidentielles comme le résultat des actions résidentielles des différents ménages de la population. Dans sa version standard comme rapporté par [65], les ménages prennent deux étapes de base, la première étape concerne la décision de quitter le logement, la seconde étape concerne la décision de résider dans un nouvel emplacement. À la première étape, les ménages estiment le «stress» de se déplacer en comparant le courant stress à la situation résidentielle désirée ; si le stress est suffisamment élevé, ils décident de changer de logement. À la deuxième étape, ceux qui sont prêts à se déplacer estiment la «résistance» au déplacement en comparant les alternatives disponibles à leur logement actuel, puis décident soit de déménager à l'une des alternatives ou bien de rester dans leur courant logement. Il continue de dire, que cette approche a plusieurs appellations « dissatisfaction», « utility » et « residential dissonance ». Le système urbain, dans ces modèles de mobilité résidentielle, regroupe espace urbain et population notamment les ménages individuelles qui exécutent des actions résidentielles à savoir la décision de changement de logement et le choix de logement.

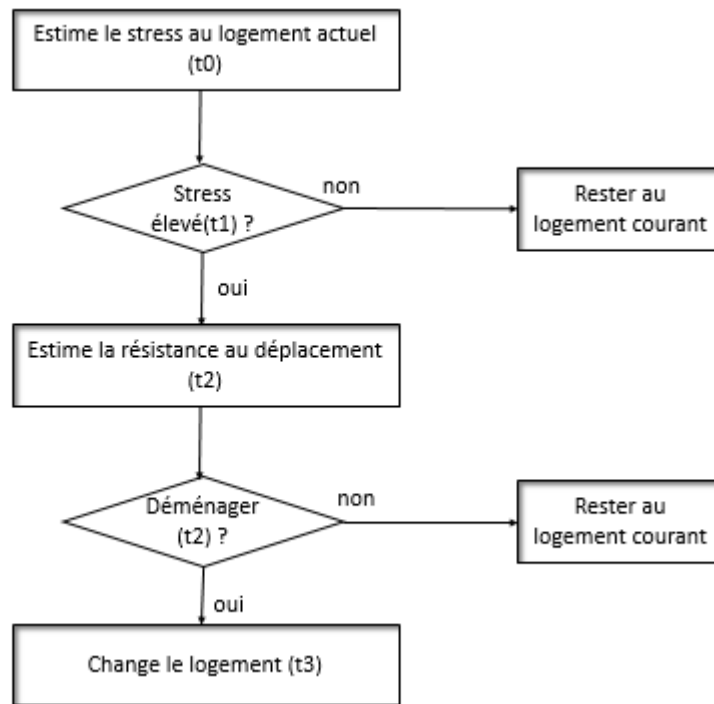


Figure 11 l'approche stress-resistance, $t_0 < t_1 < t_2 < t_3$ indique des moments consécutives de la séquence temporelle d'un ménage liée à ses actions résidentielles. [adapté de [65]]

Ces modèles de mobilité résidentielle, conçus à base de l'approche stress-resistance, sont caractérisés plus ou moins par les modules suivants :

1. un module de représentation de l'infrastructure urbaine ;
2. un module de dynamiques spatiales ;
3. un module de représentation de ménages
4. un module de changement de logement
5. un module de choix de logement
6. et un module de projection de population.

3.3. Description générale du modèle développé

3.3.1 Travaux connexes

Dans ce qui suit nous présentons les principaux modèles connexes à notre axe de travail, pour ce faire, nous nous concentrons dans leur présentation sur les sept principaux critères suivants :

1. **Support de parallélisme** : capacité d'exécution parallèle des agents ménages.
2. **Support de concurrence** : capacité de gestion d'accès aux logements partagés par les ménages.

3. **Support d'émergence de zones périphériques** : capacité d'émergence de nouvelles zones aux périphéries des centres urbains.
4. **Support d'exploration intelligente** : capacité d'exploration intelligente de la ville par les ménages.
5. **Support de prédiction probabiliste d'espace** : capacité de prédiction probabiliste d'espace urbain.
6. **Support méthodologique** : le modèle dispose-t-il d'une modélisation UML qui décrit suffisamment la vue conceptuelle du modèle.
7. **Application réelle** : le modèle est-il appliqué sur un cas d'espace urbain réel.

Dabbaghian et al [66] ont proposé un modèle de mobilité résidentielle centré sur une approche d'automates cellulaires. Le modèle permet de simuler les déplacements de ménages au sein d'un espace urbain représenté par un automate cellulaire. Dans ce modèle, la population est organisée en ménages individuels dont chacun est associé à une cellule de l'automate cellulaire qui représente le logement habité. Les règles de transition de l'AC permettent de gouverner les ménages dans leurs décisions de changement de logement. Le modèle permet aussi d'utiliser deux types de voisinages à savoir le voisinage de Van Neumann et le voisinage de Moore. Les ménages pour chercher un logement, ils explorent toute la zone urbaine. En réalité, l'exploration et la recherche de logements est progressive, le ménage explore son district d'abord, s'il ne trouve pas de logements convenables il grandit le champ d'exploration et il recommence ainsi de suite jusqu'à explorer toute la zone urbaine. Les ménages ne s'exécutent pas en parallèle et n'entrent pas en concurrence lors de choix de logement. Une représentation très réduite de l'espace urbain a été utilisée. Ce dernier ne représente que la distribution des catégories de ménages. Il ne représente pas les zones bâties, les zones vertes, les zones routières etc. L'équipe du projet consiste de membres de champs d'informatique, criminologie, science environnementale, géographie, et mathématique. Les auteurs utilisaient la documentation des réalisations comme méthodologie de communication, et rapportent le manque de documentation UML de leur modèle. En fait, même si le modèle décrit bien le fonctionnel mais il ne dispose pas de modélisation UML qui peut donner une vue claire de la réalisation. Le modèle est dans sa phase initiale de test. Il manifeste des limitations dont la majeure est la non application sur un cas réel de ville qui demande des données d'enquêtes ménages, des données spatiales et de données de crime. Le modèle utilise en fait des données synthétiques et aléatoires sur les ménages. Les auteurs espèrent incorporer des données spatiales, des crimes et d'enquêtes

ménages afin de tester si les règles régissant le modèle sont une réflexion exacte de la mobilité résidentielle dans une ville canadienne de moyenne taille.

Jackson et Spicer ont proposé un modèle de simulation de dynamique résidentielle. le modèle est une extension du modèle de Dabbaghian et al [66]. Dans le modèle, l'environnement est représenté par une grille d'automate cellulaire. les cellules individuelles représentent les logements. les ménages sont représentés par de simple agent automate. La caractéristique la plus importante d'un ménage est sa structure sociale qui regroupe entre autres le revenu du ménage, l'éducation, l'origine ethnique. L'hypothèse sur laquelle repose le modèle est que les ménages cherchent des logements où la cohérence sociale est plus grande. Les auteurs considèrent leur modèle d'être un modèle hybride Agent-AC puisque les changements locaux sont propagés par l'automate cellulaire et que les unités ménages sont représentés par des agents ayant la capacité de mouvoir. L'approche agent utilisée dans ce modèle ne dépasse pas son cadre théorique et conceptuel [65]. Les ménages de ce fait ne s'exécutent pas en parallèle et n'entrent pas en concurrence lors de choix de logement. Le modèle représente l'espace urbain en utilisant neuf types d'occupation du sol à savoir zones de développement urbain, habitation unifamiliale, habitation bifamiliale, habitation multifamiliale, Agriculture limitée, zones commerciales, zones historiques, zones industrielles légères, et zones industrielles. De ce fait, le modèle est amélioré par rapport à son prédécesseur qui n'utilise qu'une représentation réduite de l'espace qui ne considère que les catégories de ménages. Le modèle garde le même type de voisinage notamment le voisinage de Moore avec au maximum 8 voisins pour la cellule en question. La principale amélioration dans ce modèle est son intégration des données spatiales de la ville Vancouver choisie pour la raison de disponibilité de données. Les données de l'occupation de sol sont issues du catalogue des données ouvertes 2009 et de l'enquête de Canada 2006. Les données sur les ménages (notamment leurs structures sociales) et les données de crimes, comme prévus dans le modèle de base, sont encore indisponibles. Bien qu'il n'en soit encore qu'à ses débuts, ce projet illustre plusieurs considérations pouvant être soulevées lors de l'application complète d'un modèle de simulation sur des données réelles. Comme son modèle parent, le modèle ne dispose pas de support conceptuel UML qui montre clairement la modélisation logicielle du modèle de simulation.

Agbossou et al [50] ont proposé un modèle de simulation de mobilité résidentielle qui permet de réaliser des expérimentations par voie informatique d'un système de mobilité résidentielle. le modèle VisualSimores proposé est centré sur une approche des automates cellulaires et de systèmes multi-agents. La zone urbaine étudiée était la commune de Saône (Est de la France). Dans le modèle, l'espace urbain a été bien représenté en utilisant les différentes occupation du

sol recensées de la commune Saône (eau, espace vert, réseau, commerce, équipement , appartement loué, appartement acheté, maison louée, maison achetée, zone constructible). En plus, le modèle contient un module de prédiction spatiale construit des règles de connaissances de type 'IF-THEN'. Ce module permet de prédire la carte de l'occupation du sol suivante à partir de la carte présente. Le modèle utilise un voisinage de Moore qui regroupe théoriquement huit voisins. Lors de la recherche d'un nouveau logement, l'exploration est faite sur toute la commune, ce qui représente mal le comportement des ménages lors de la recherche de nouveaux logements. Les agents ménages dans le modèle VisualSimores sont implémentés à travers une programmation orienté objet qui se caractérise par une exécution en séquence des agents ménages. Deux raisons peuvent être derrière ce choix. La première raison est la simplification du développement du modèle vu que la programmation orientée agent demande plus d'effort et une implication d'une plateforme de développement de systèmes multi-agent. La deuxième raison peut-être la confusion faites par les programmeurs familiers avec la POO entre la notion d'agent et la notion d'objet comme déjà discuté dans la partie « Systèmes multi-agents du chapitre généralités ». Les ménages en réalité sont autonomes, agissent simultanément et entrent en concurrence lors par exemple de recherche de nouveaux logements. De ce fait, une implémentation orienté agent est incontournable pour représenter efficacement les ménages dans un modèle de simulation. Les données ménages-déplacements et les données spatiales utilisées dans les expérimentations de la commune de Saone, proviennent respectivement de l'enquête Ménages-Déplacements (2004,2005), des photographies aériennes et des documents d'urbanisme. Les résultats du modèle étaient contre-intuitifs. Ceci est du probablement à une lacune de l'échantillon des données de l'enquête ménages qui ne prennent pas en compte l'occupation de sol de type « appartement en propriété ». Le modèle dispose d'une modélisation UML assez descriptive de point de vue statique. Néanmoins, la dite modélisation ne prend pas en considération les points suivants 1) la conception agents des ménages 2) la traçabilité de l'évolution de l'espace 3) la traçabilité de l'évolution de la population 4) et l'interconnexion des processus urbains.

Gaube et al [74] [73] ont proposé un modèle de décision centré sur une approche multi-agents. Le modèle est appliqué sur la ville Vienna d'Australie. L'objectif de modèle est de simuler les nouvelles distributions spatiales des différents types de ménages en se basant sur des scénarios de dynamiques démographiques et migratoires. Le savoir des catégories de ménages, leurs tailles et leurs distributions spatiales permettra aux auteurs d'évaluer la répartition de la consommation d'énergie par ménages dans la ville. Le modèle intègre un modèle démographique qui permet de projeter la population et un modèle de mobilité des ménages qui permet à chaque ménage de décider de changer de logement ou pas. Les deux sous-modèles

utilisent des données d'apprentissage. Comme rapporté par les auteurs le modèle utilise une grille de cellules. L'espace est ainsi divisé en un ensemble d'unités spatiales qui contiennent chacune un bon nombre de logements. Chaque logement a une surface et un prix en mètres carrés. Les ménages ont des propriétés comme l'âge, et le type de famille qui distingue sept types : Jeune seule, vieux seule, couple jeune, couple vieux, parent seule, petite famille et grande famille. Le modèle contient aussi un module de dynamique de l'espace. Le changement de l'espace de modèle se fait par scénarios de simulation. Pour un scénarios donnée, le module accepte manuellement comme paramètre le nombre de logements pour chaque cellule et chaque année de simulation. La recherche de logements par ménages est conditionné par l'identification de la zone d'exploration. Cette zone d'exploration est défini par le nombre de zones de recherche paramétrées initialement dans le modèle. Les auteurs pour qu'ils appliquent le modèle sur la ville de Vienna, ils ont utilisé des données provenant des enquêtes 2001,2004-2005,2006-2008 de Statistics Australia. Les données contiennent 1) Une population synthétique de la ville de Vienna ; 2) Des données démographiques ; 3 et une distribution des logements dans la grille de cellules représentant la ville. Malgré que la vue fonctionnelle et mathématique du modèle sont bien décrites mais il ne dispose pas de modélisation UML qui donne une vue claire de la réalisation.

Jordan et al [52] ont proposé un modèle informatique qui permettra d'explorer les relations causales intrinsèques d'un système de mobilité résidentielle. le modèle représente la mobilité résidentielle et le choix de logement des ménages du district EASEL du Royaume-Uni . Les ménages du disrict sont représentés par une approche agent, tandis que l'espace urbain est représenté par des grilles. Les grilles sont produites via un processus de discrétisation. Les routes et les importants bâtiments sont enregistrés dans un fichier shapefile dans lequel les routes, les écoles et les logements sont représentés respectivement par des lignes, des points et des polygones. Il s'agit d'une représentation réduite de l'espace urbain. Pour l'approche agent, les données individuelles sur les ménages sont obligatoires. Le modèle implémente les agents moyennant la plaeforme Repast de développement d'agents. Les données statistiques utilisées sont l'âge, l'origine ethnique, le type de logment, le type d'occupation et la propensité à la mobilité. Ce dernier est un indicateur qui confirme si le ménage a changé de logement dans l'an précédent l'enquête réalisée (CCSR 2010). Le modèle utilise un rayon d'exploration d'environ 1.6 km qui couvre tout le district. L'exploration prend en considération d'autres critères comme la proximité aux écoles, aux centres religieux etc. Le modèle ne considère pas la dynamique de l'espace urbain. L'espace est constant et n'évolue pas en temps. Or en réalité, l'espace évolue, des zones constructibles s'ajoutent aux périphéries des centres urbains. Les auteurs pour qu'ils appliquent le modèle sur le district EASEL, ils ont utilisé des données ménages issues du dit H-

SAR (the Household Sample of Anonymised Records) et des données spatiales du dit Edina UK Borders et Ordnance Survey MasterMap. Le modèle décrit bien la vue algorithmique et fonctionnelle. Pourtant il ne décrit pas la vue conceptuelle. En revanche, le modèle utilise une méthodologie dédiée à la plateforme de développement Repast Symphony.

Haase et al [46] ont proposé un modèle de simulation centré sur une approche multi-agents. Le modèle est appliqué sur la ville en déclin Leipzig, dans l'est de l'Allemagne. L'objectif de modèle est de simuler la mobilité résidentielle et les dynamiques de l'occupation du sol. Un déclin de population marque la ville, la simulation permettra ainsi de calculer les distributions spatiales des déplacements de ménages, la demande de logements et de logements vacants. Le modèle intègre trois majeurs composants : un module de représentation de la population ; un module de représentation de l'espace urbain particulièrement les logements ; et un module de prise de décision des ménages regroupant la mobilité résidentielle et le choix de logement. Le modèle contient aussi un modèle démographique qui permet de projeter la population de la ville. Les ménages dans le modèle sont classés en huit catégories : jeune célibataire, deux jeunes cohabitants, âgé célibataire, deux âgés cohabitants, famille avec enfants, famille monoparentale avec enfants, personnes cohabitants. L'espace urbain est défini par un automate cellulaire régulier de cellules et leur localisation. L'espace a été bien représenté dans le modèle. La taille de cellule est de 10 mètres. Le voisinage d'une cellule est défini par un rayon de 500 mètres. Comme rapporté par les auteurs, les ménages sont supposés être autonomes et sont orientés objets. Les agents sont alors implémentés moyennant une programmation orienté objet. Pour appliquer le modèle sur la ville de Leipzig, plusieurs sources de données ont été utilisées. Les données démographiques et sur ménages proviennent de l'enquête micro de Saxony. Les données d'occupation du sol et d'infrastructure proviennent respectivement du système d'information topographique et des statistiques de la municipalité. Comme le modèle de Jordan et al [52], ce modèle utilise la plateforme Repast Symphony de développement de systèmes multi-agents. Il décrit bien la vue algorithmique et fonctionnelle. Pourtant la modélisation UML fait défaut à ce travail.

Le tableau suivant résume les différences principales des modèles par rapport aux critères retenus :

	Parallélisme	Concurrence	Support d'émergence de zones périphériques	Prédiction d'espace	Exploration intelligente	support méthodologique	Application réelle	plateforme agent
Dabbaghian 2010	-	-	-	-	**	-	-	non
Jackson et Spicer 2012	-	-	-	-	**	-	**	non
agbossou ; 2007	-	-	***	**	**	**	***	non
gaube et al 2016	-	-	***	**	**	-	***	non
Jordan 2012	***	***	-	-	**	**	***	oui
haase et al 2010	-	-	-	-	**	**	***	oui

Légende : *** : fortement ; ** : moyennement ; * : faiblement ; - : non supporté(e) ou non décrit(e)

3.3.2 Hypothèse de fonctionnement

Le modèle de simulation de mobilité résidentielle que nous proposons s'inscrit dans cette nouvelle tendance d'alliance d'approches SMA et AC pour la modélisation et la simulation des systèmes urbains.

Ce modèle représente l'espace urbain par un automate cellulaire à deux dimensions. Ainsi, l'espace urbain est considéré comme un ensemble d'unités spatiales uniformes juxtaposées. Le modèle représente les ménages constituant la population de l'espace urbain par des agents mobiles ayant la capacité de mobilité dans l'espace urbain. Les agents ménages utilisent des données socio-économiques provenant des enquêtes ménages.

Les agents prennent des décisions de façon autonome. Chaque agent décide pour lui-même s'il veut changer de logement ou pas. Si cette décision est positive, il commence à chercher un nouveau logement qui lui convient. Il s'agit d'agents cognitifs qui sont dotés d'une capacité de raisonnement à propos de leur mobilité et choix de logements. En fait, chaque agent est doté d'une fonction de décision de mobilité conçue moyennant un modèle probabiliste basé sur des concepts mathématiques de réseaux bayésiens. Il est doté aussi d'une fonction de choix du meilleur logement parmi une liste de logements convenables à son désir. Ainsi un agent explore l'espace urbain en commençant par le voisinage le plus proche. En cas de besoin, l'agent ménage grandit son champ de recherche jusqu'à trouver un logement convenable.

Le modèle régit aussi la dynamique de l'espace urbain à travers une couche de chaîne de Markov complémentaire à l'automate cellulaire. Les règles de transition de l'automate cellulaire sont

ainsi régit suivant un modèle probabiliste utilisant des concepts mathématiques de chaîne de Markov.

Le modèle gouverne aussi la croissance de la population à travers un sous modèle de projection de population. De façon annuelle, une nouvelle génération de ménages est générée à partir de la précédente génération en utilisant des indicateurs démographiques comme le taux de naissance, le taux de départ d'un membre, le taux de mariage, le taux de divorce et l'espérance de vie.

3.3.3 Objectif du modèle proposé

L'objectif de notre modèle est la simulation de la mobilité résidentielle et la croissance urbaine qui lui est associée dans un horizon de dix ans. La ville étant la place où les deux phénomènes s'exécutent, est le résultat des choix résidentiels à l'échelle individuel des ménages. Le système urbain en global est composé d'un espace urbain, d'un ensemble de ménages, d'un ensemble de logements et de la dimension temps. L'espace urbain y compris les logements est approché par une grille d'automate cellulaire. Les ménages composant la population sont approchés par un système multi-agents. La Figure 12 présente l'interaction mutuelle des différents modules de notre modèle de simulation de la mobilité résidentielle.

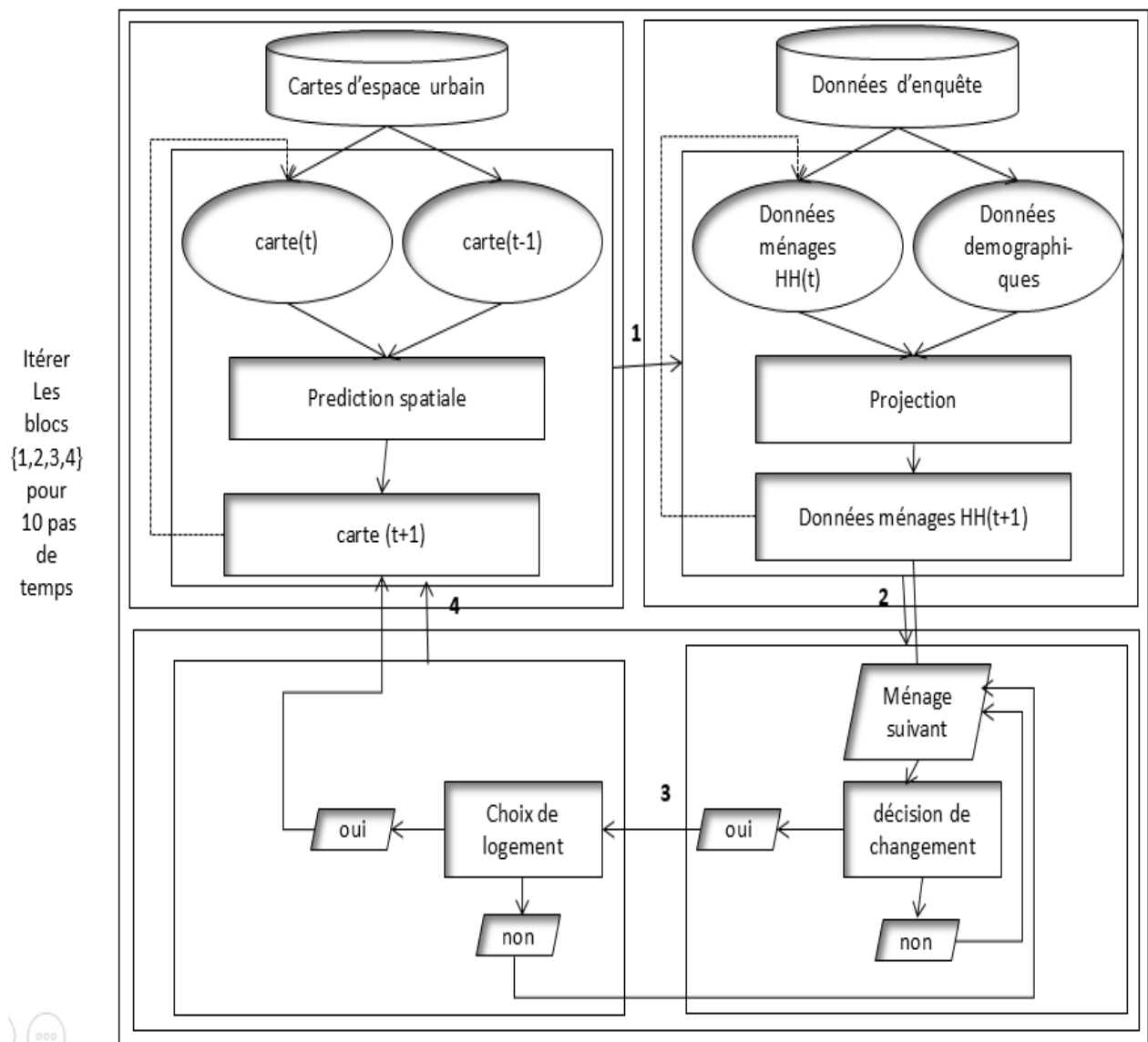


Figure 12 Interaction des composants du système de simulation de la mobilité résidentielle

3.4. Description détaillée du modèle

Pour mieux exposer le modèle, nous présentons ses principaux sous modèles qui sont:

- Le sous modèle d'automate cellulaire
- Le sous modèle de chaîne de Markov
- Le sous modèle de système multi-agent
- Le sous modèle de choix de logement
- Le sous modèle de réseau bayésien
- Le sous modèle de projection de population

3.4.1 Le sous modèle d'AC

Le modèle d'AC est conçu pour la représentation de l'occupation du sol de l'espace urbain. Il consiste en une grille de cellules régulières finies. La grille choisie est la grille de deux dimensions (n,m) où n est le nombre de cellules dans l'axe X, et m le nombre de cellules dans l'axe Y. en effet, chaque cellule peut être identifiée comme C_{ij} où i est l'indice de colonne et j l'indice de ligne. Les cellules ont été conçues pour avoir une forme carrée d'une résolution spatiale paramétrable de dix mètres carrés capable de représenter les unités spatiales les plus élémentaires qui sont les maisons et appartements. La grille a été conçue pour que le nombre d'états soit fini et chaque cellule ait un seul état représentant l'occupation du sol. Ensuite chaque cellule détermine les cellules voisines selon soit le voisinage de Moore ou bien selon celui de Van Neumann.

Les états du modèle d'AC représentent les différents groupes représentant l'occupation du sol de la zone urbaine étudiée. L'ensemble des états est composé d'états statiques et dynamiques. Les états statiques sont réseaux routiers et ferrés, rivières ou lacs, espace vert et forêts, immeubles commerciaux et d'équipements. Les états dynamiques sont maison en propriété, maison en location, appartement en propriété, appartement en location et zone constructible. Cet ensemble d'états est adaptable à la zone urbaine étudiée. Il peut être reconfiguré selon les spécificités de chaque nouvelle zone urbaine étudiée.

Le type de voisinage dans le modèle d'AC permet de déterminer les voisins d'une cellule dans l'AC. En relation avec la modélisation de la Mobilité résidentielle, il permet de savoir l'entourage d'une maison ou un appartement spécifique. Le type choisi dans le modèle d'AC est le voisinage de Moore. En utilisant la formule de voisinage $(2r + 1)^2 - 1$ où r est le rayon du voisinage, on définit le nombre maximal de voisins. Par exemple, sachons que le rayon=1, chaque cellule peut avoir théoriquement huit voisins. Cependant, il existe quelques exceptions : par exemple les cellules C_{00} , C_{0j} , C_{i0} et C_{ij} ont trois voisins vu qu'il s'agit des cellules aux quatre coins de l'AC. En incrémentant le rayon, Ces exceptions augmentent et le nombre de voisins des cellules adjacentes aux coins de l'AC devient de plus en plus petit.

L'interaction spatiale d'une cellule avec les cellules voisines est modélisée par une équation du potentiel d'attraction. Le potentiel d'attraction $P_{C_{ij}}$ d'une cellule C_{ij} mesure le rapport de nombre de cellules qui ont le même état que la cellule en question et le nombre total de cellules voisines. α_{ij} est un facteur d'accélération obtenu par la fonction sigmoïde où t est le temps et λ est un paramètre prédéfini de qualité résidentielle.

$$P_{C_{ij}} = \frac{\sum N_{C_{ij}} * \alpha_{ij}}{TNN} \text{ et } \alpha_{ij} = \frac{1}{1+e^{-\lambda t}} \quad (3)$$

Le modèle d'AC utilise et paramètre initialement deux cartes de l'occupation du sol qui devraient être prises dans deux années successives. Dans notre cas on a créée deux cartes 2006 et 2007. Les cartes ont été conçues dans un format particulier moyennant un éditeur de cartes développé et intégré dans le logiciel de simulation proposé par les auteurs. La préparation de ces cartes nécessite différentes couches de données spatiales de la zone étudiée (infrastructures routières et ferroviaires, zones bâties, zones de construction, etc.).

3.4.2 Le sous modèle de Chaîne de Markov

Le modèle de chaîne de Markov est conçu pour prédire la carte de l'occupation du sol à l'étape $t+2$ à partir des cartes aux étapes t et $t+1$.

Une chaîne de Markov est formellement une séquence de variables aléatoires $(X_n, n = 0, 1, \dots)$ ayant des valeurs dans un ensemble fini appelé l'espace d'états de la chaîne de Markov.

$(X_n, n > 0)$ est dite une chaîne de Markov si :

$$\forall i_0, i_1, \dots, i_{n-1}, i, j \in S, \forall n \geq 0, \\ P(X_{n+1} = j | X_0 = i_0, X_1 = i_1, \dots, X_{n-1} = i_{n-1}, X_n = i_n) = P(X_{n+1} = j | X_n = i_n) \quad (4)$$

La variable aléatoire X_n représente l'état du système à l'étape n . le processus de Chaînes de Markov démarre depuis un des états et meut successivement à un autre état. Le processus meut de i à j dans l'étape suivante avec une probabilité notée P_{ij} . l'état X_{n+1} à l'étape $n+1$ dans le système peut être calculée à partir de l'état X_n à l'étape n en utilisant la formule suivante :

$$X_{n+1} = P X_n \quad (5)$$

X_n est le vecteur d'états à l'étape n , P_{ij} sont les probabilités de transition composant la matrice de probabilités de transition calculée moyennant la formule suivante :

$$P = \begin{bmatrix} P_{11} & \cdots & P_{1m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{m1} & \cdots & P_{mm} \end{bmatrix} \quad (6)$$

Où m est le nombre de types d'occupation du sol, P_{ij} est la probabilité de transition du type i au type j . l'espace d'états du système de chaîne de Markov, n'est rien d'autres que l'espace d'états du système d'Automate Cellulaire.

En se basant sur la théorie des processus stochastiques de chaînes de Markov, la probabilité de transition d'un état i à un état j en exactement n étapes est calculée en utilisant l'équation de Chapman-Kolmogorov suivante :

$$P_{ij}^n = \sum_{k \in S} P_{ik} P_{kj}^{(n-1)} \quad (7)$$

Où S est l'espace d'états de la chaîne de Markov, la matrice de probabilités de transition à l'instant n peut être calculée par la matrice de probabilité de transition à l'instant $n-1$.

Le vecteur de distribution de probabilité d'états initial noté par $\pi(0)$ désigne les probabilités d'états à l'étape 0. La distribution de probabilité $\pi(n)$ à l'étape n se calcule avec la formule suivante :

$$\pi(n) = \pi(0)P^{(n)} \quad \text{où} \quad \pi(n+1) = \pi(n) * P \quad (8)$$

Eu égard aux équations précédentes, l'équation de la probabilité de transition d'une cellule de son état actuel à l'état e dans l'étape $t+1$ s'écrit comme dans la formule (9). La formule implique le voisinage de la cellule et l'état passé de son voisinage pour prédire l'état futur de la cellule.

$$P(C_{ij}^{t+1} = e) = \sum_{ij \in \text{Neighborhood}} P(C_{ij}^t = e | C_{ij}^{t-1} = e') * P(C_{ij}^{t-1} = e') \quad e' \in E \setminus \{e\} \quad (9)$$

Où ij sont les indices de ligne et colonne de la cellule en question dans la grille d'Automate Cellulaire. e' est l'état actuel de la cellule en question. e représente un des états auxquels peut transiter la cellule C_{ij} .

Parce que la cellule transite vers l'état ayant la probabilité de transition maximal, il faut donc choisir l'état qui vérifie la contrainte dans la formule (10), c.-à-d. l'état parmi l'ensemble des états lequel ayant la plus grande probabilité de l'équation (9).

$$\arg \max_e P(C_{ij}^{t+1} = e) \quad (10)$$

En combinant le sous modèle automate cellulaire et le sous modèle de chaîne de Markov, nous sommes en mesure de modéliser l'espace urbain et sa dynamique. Le sous modèle automate cellulaire donne les moyens clés pour représenter l'espace urbain. Le sous modèle chaîne de Markov gouverne les règles de transition de l'automate cellulaire. L'algorithme suivant mis en évidence la conception de règles de transition de l'automate cellulaire moyennant les chaînes de Markov.

Algorithme : règles de transition probabiliste moyennant les chaînes de Markov à l'instant t

Entrées : t :entier /* temps t */

- Récupérer Liste de cellules dynamiques à l'instant t
- Pour chaque cellule C_{ij}
 - Calcul de probabilité de transition $P(C_{ij}^{t+1} = e)$ vers tous les états dynamiques
 - Choix de l'état e ayant la plus grande probabilité $P(C_{ij}^{t+1} = e)$
 - Calcul du potentiel d'attraction
 - Si <cellule> est logement ET potentiel ≥ 1.0
 - Cellule transite de l'état actuel vers l'état e
 - Sinon Si <cellule> est zone constructible ET <cellule> proche de logements
 - Cellule transite vers l'état e

Figure 13 règles de transition probabiliste moyennant les chaînes de Markov à l'instant t

Pour pouvoir faire fonctionner cet algorithme ci-dessus dans les différents instants de la simulation, les matrices de transition et les vecteurs de distribution de probabilités d'états aux différents instants du système devraient être calculés auparavant. Ainsi, pour calculer la matrice de transition initiale et le vecteur de distribution de probabilité d'états initiaux à l'instant zéro, le sous modèle de chaîne de Markov utilise deux cartes initiales de l'occupation du sol paramétrables dans le modèle. Ensuite, il génère les matrices de transition et les vecteurs de distribution de probabilités d'états aux instants suivants en utilisant respectivement l'équation (7) et l'équation (8).

3.4.3 Le sous modèle de Systèmes multi agents

Un système multi-agent est composé d'un nombre d'agents qui agissent et interagissent les uns avec les autres dans un environnement souvent partagé. Un agent est 1) une entité autonome - il agit en fonction de sa propre croyance et connaissance - 2) une entité sociale - il interagit en utilisant un langage de communication - 3) réactif - il peut percevoir et réagir à son environnement - 4) proactif - il est capable de montrer un comportement centré sur des objectifs en prenant des initiatives-.

Dans ce sous modèle de systèmes multi-agent, l'objectif est de concevoir la dynamique de la population de la ville à une échelle individuelle de ménages. Depuis les choix résidentiels individuels des ménages, ce sous modèle permettra l'émergence des dynamiques de mobilité résidentielles à l'échelle de la ville. Le sous modèle spécifie les agents, leurs données intrinsèques -propriétés et leurs actions-.

Agents: chaque ménage est représenté par un agent et est classé selon sa structure familiale. Les agents prennent les propriétés des ménages (c'est-à-dire l'âge, le revenu, la structure familiale et le statut d'occupation). Ainsi, ils sont capables de représenter des unités de ménages pendant la simulation. Chaque agent a aussi un lien avec le logement (la cellule d'automate cellulaire représentant le logement) où il habite. Ces caractéristiques donnent à chaque agent un profil unique et des choix résidentiels distincts. Des changements dans le profil du ménage pourraient survenir à tout moment. Ils sont régis par des événements démographiques et des principes de croissance démographique. Chaque agent interagit avec ses voisins. Ainsi, il pourrait acquérir des informations dont il a besoin sur son quartier et les agents de son entourage.

Actions: les actions traduisent les choix résidentiels de l'agent. Nous avons utilisé l'architecture BDI qui est adéquate pour modéliser les spécifications de l'agent ménage. En tant qu'agent cognitif, l'agent du ménage décide de manière autonome en fonction des préférences de son profil. Des changements de profil pourraient survenir à tout moment et influencer par la suite ses décisions résidentielles. Deux processus résidentiels ont une grande importance, à savoir la propension à la mobilité et le choix de logement. Le premier processus permet à l'agent de calculer son satisfaction résidentielle et déterminer ensuite son objectif de déménager ou non. Le second processus permet à l'agent de chercher un logement qui répond à ses besoins résidentiels. Ces deux processus seront expliqués en plus de détail dans la section suivante.

3.4.4 Le sous modèle de Réseaux bayésiens

Le réseau bayésien est un modèle graphique probabiliste qui représente un ensemble de variables aléatoires ainsi que leurs dépendances conditionnelles en utilisant un graphe orienté acyclique.

L'objectif de ce sous-modèle est de concevoir et mettre en œuvre le processus de décision de mobilité moyennant des variables explicatrices permettant aux ménages d'avoir la capacité de décision de changement de logement.. La Figure 14 illustre le modèle de processus de mobilité basé sur le réseau bayésien.

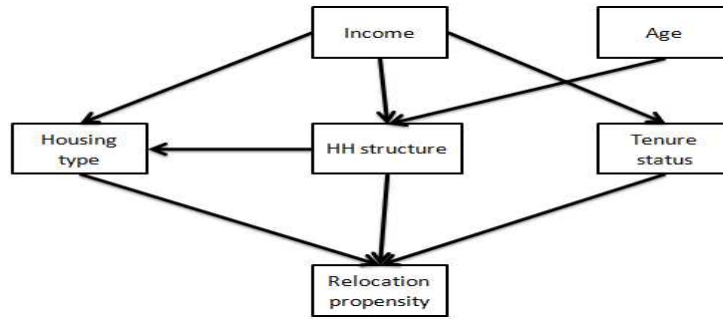


Figure 14 représentation des variables dans le modèle de réseau bayésien

Un agent ménage calcule son propension au changement de logement comme formulé dans l'équation (11) :

$$P(\chi_1 \dots \chi_n) = \prod_{i=1}^n P(\chi_i | \Gamma_{\chi_i}) \text{ où } \Gamma_{\chi_i} \text{ sont les parents de } \chi_i \quad (11)$$

Le processus de choix de logement qui permet de chercher un nouveau logement pour le ménage est influencé par la qualité résidentielle λ et les propriétés de l'actuel et futur logement. Le choix de logement n'est effectué qu'après que l'agent ménage décide de changer son logement. le processus de choix de logement se résume aux étapes suivantes : l'agent ménage définit un champ d'investigation basé sur son voisinage dans la grille de l'Automate Cellulaire ; l'agent sélectionne un nombre de logements qui ont une qualité résidentielle qui satisfait ses besoins résidentiels ; l'agent choisit le logement ayant le plus grand score.

Un agent ne peut être satisfait d'un logement que si le potentiel d'attraction de ce logement $P_{C_{ij}}$ est supérieur au confort résidentiel actuel de l'agent ménage ($P_k^t * \lambda$). P_k^t est la propension à la mobilité de l'agent ménage de type k ayant le vecteur de caractéristiques K au temps t.

$$P_k^t = P(\text{relocation} | K) \quad (12)$$

L'agent ménage calcule le score de logement en utilisant l'équation suivante :

$$P_k^{t+1}(C_{ij}^{t+1} = e) = P_k(C_{ij}^{t+1} = e | C_{ij}^t = e') * P(C_{ij}^t = e') \quad (13)$$

L'agent choisit ensuite le logement ayant le plus grand score :

$$\operatorname{argmax}_{C_{ij}} P_k^{t+1}(C_{ij}^{t+1} = e) \quad (14)$$

En combinant le sous modèle système multi-agents et le sous modèle réseau bayésien, nous sommes en mesure de modéliser les agents ménages et leurs actions résidentielles notamment

la mobilité et le choix de logement. Le sous modèle système multi agent permet de modéliser la spécification des agents ménages. Ensuite le sous modèle réseau bayésien modélise dans les agents une capacité cognitive qui leur permet d'agir intelligemment. Les algorithmes suivants mettent en évidence respectivement la conception de la mobilité résidentielle des agents ménages et de choix de logement d'un agent ménage.

Algorithme : Mobilité résidentielle des agents ménages à l'instant t

Entrées : t:entier /*temps t*/

- Récupérer Liste d'agents ménages à l'instant t
- Récupérer Liste de maisons à l'instant t
- Récupérer Liste d'appartements à l'instant t
- Pour chaque agent
 - SI Désir = 'HabiterUneMaison'
 - Chercher une maison convenable
 - Récupérer <maison>
 - Récupérer l'action de l'agent
 - SI action = 'MaisonAchetée' ET statusOccupation = 'Propriétaire'
 - Agent migre vers la nouvelle <maison>
 - SI action = 'MaisonLouée' ET statusOccupation = 'Locataire'
 - Agent migre vers la nouvelle <maison>
 - SI Désir = 'HabiterUnAppartement'
 - Chercher un appartement convenable
 - Récupérer <appartement>
 - Récupérer l'action de l'agent
 - SI action = 'AppartementAcheté' ET statusOccupation = 'Propriétaire'
 - Agent migre vers le nouveau <appartement>
 - SI action = 'AppartementLoué' ET statusOccupation = 'Locataire'
 - Agent migre vers le nouveau <appartement>

Figure 15 Mobilité résidentielle des agents ménages à l'instant t

Algorithme : Choix de logements vérifiant les désirs de l'agent à l'instant t

Entrées : t:entier /*temps t*/

- SI agent occupe un logement
 - Pour chaque Exploration {rang 1, rang 2, rang7, commune}
 - Récupérer les logements à l'instant t
 - Pour chaque logement
 - Calculer score =
PropensionAMigrer*QualitéLogementActuel
 - SI Potentiel d'attraction > score
 - Ajouter à la liste de logements vérifiant désirs du ménage
 - S'il trouve des logements convenables

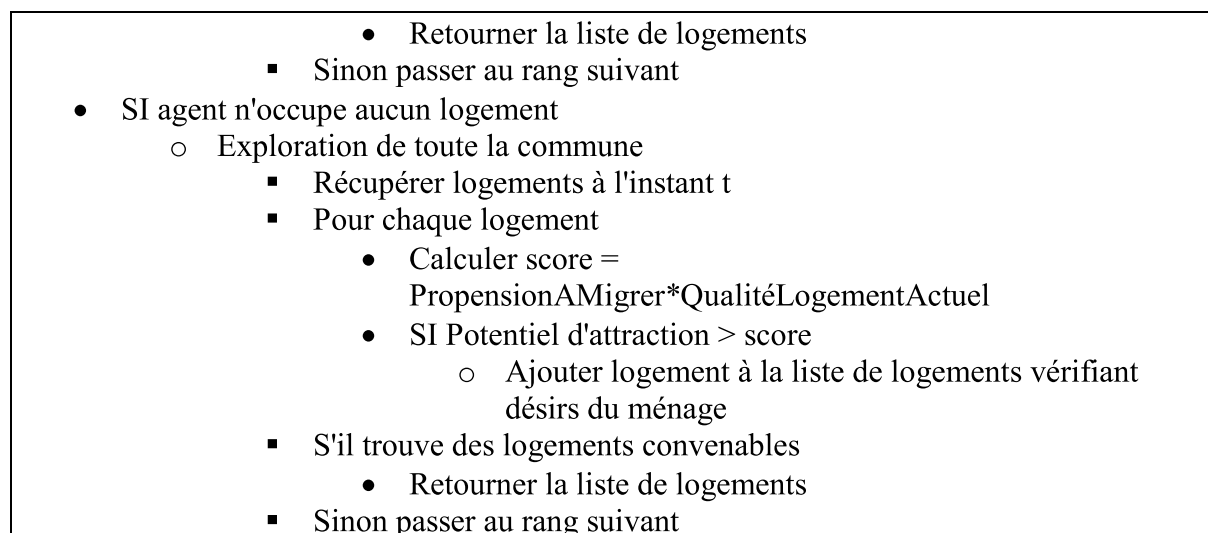


Figure 16 Choix de logements vérifiant les désirs de l'agent à l'instant

3.4.5 Le sous modèle de projection de population

Le sous modèle de projection de la population est centré sur le ménage. Il prend en compte quatre types de ménages qui sont famille avec enfants, famille sans enfants, famille avec un seul parent, et personne seule. De façon annuelle, une nouvelle génération de ménages est projetée à partir de la précédente génération en utilisant des indicateurs démographiques notamment, le taux de naissance, le taux de départ d'un membre, le taux de mariage, le taux de divorce et l'espérance de vie. La Figure 17 illustre les équations algorithmiques qui composent le sous modèle de projection.

L'équation (15) soustrait de l'effectif de personnes seules l'effectif de personnes seules qui se sont mariés. L'équation (16) additionne à l'effectif de personnes seules l'effectif de jeunes qui ont fait départ de famille avec enfants et familles monoparentales. L'équation (17) additionne à l'effectif de familles sans enfants l'effectif de familles nouvellement mariées. L'équation (18) soustrait de l'effectif de familles sans enfants les familles sans enfants nouvellement séparées. L'équation (19) additionne à l'effectif de personnes seules l'effectif de familles sans enfants nouvellement séparées. L'équation (20) soustrait de l'effectif de familles avec enfants l'effectif de familles avec enfants nouvellement séparées. L'équation (21) additionne à l'effectif de personnes seules l'effectif de parents ayant quitté leurs familles avec enfants. L'équation (22) additionne à l'effectif de familles monoparentales l'effectif de familles monoparentales nouvellement créées à cause de la séparation d'un des parents de leurs familles avec enfants. L'équation algorithmique (23) additionne à l'effectif de Famille Avec Enfants, l'effectif de Famille Sans Enfant qui ont eu de nouveaux nés. Une Famille Avec Enfant, s'elle a un nouveau-né, elle reste encore Famille Avec Enfant. En effet, écrire $\text{Effectif}_{FAE}^{t+1} += (\text{Effectif}_{FSE}^t +$

$\text{Effectif}_{\text{FAE}}^t * T_{\text{naissance}}$ est une vraie erreur algorithmique qui accroît l'effectif de Famille Avec Enfant de façon biaisée.

La disparition de ménages peut être modélisée en utilisant soit un taux de mortalité appliqué sur les différents types de ménages soit en se basant sur l'espérance de vie. Pour faire simple, l'espérance de vie a été choisie. Un ménage de type personne seule ne trouve la mort que s'il atteint cette espérance de vie paramétrable dans le modèle. Les autres types de ménages ne seront pas influencés par la disparition de leur chef de ménage dans le sens où nous supposons qu'il y aura substitution par un autre membre du ménage.

$$\text{Effectif}_{\text{PS}}^{t+1} += \text{Effectif}_{\text{PS}}^t * (1 - T_{\text{mariage}}) \quad (15)$$

$$\text{Effectif}_{\text{PS}}^{t+1} += (\text{Effectif}_{\text{FAE}}^t + \text{Effectif}_{\text{FM}}^t) * T_{\text{départ}} \quad (16)$$

$$\text{Effectif}_{\text{FSE}}^{t+1} += \frac{1}{2} * \text{Effectif}_{\text{PS}}^t * T_{\text{mariage}} \quad (17)$$

$$\text{Effectif}_{\text{FSE}}^{t+1} += \text{Effectif}_{\text{FSE}}^t * (1 - T_{\text{divorce}}) \quad (18)$$

$$\text{Effectif}_{\text{PS}}^{t+1} += 2 * \text{Effectif}_{\text{FSE}}^t * T_{\text{divorce}} \quad (19)$$

$$\text{Effectif}_{\text{FAE}}^{t+1} += \text{Effectif}_{\text{FAE}}^t * (1 - T_{\text{divorce}}) \quad (20)$$

$$\text{Effectif}_{\text{PS}}^{t+1} += \text{Effectif}_{\text{FAE}}^t * T_{\text{divorce}} \quad (21)$$

$$\text{Effectif}_{\text{FM}}^{t+1} += \text{Effectif}_{\text{FAE}}^t * T_{\text{divorce}} \quad (22)$$

$$\text{Effectif}_{\text{FAE}}^{t+1} += \text{Effectif}_{\text{FSE}}^t * T_{\text{naissance}} \quad (23)$$

Figure 17 le sous modèle de projection de population

3.5. Origines et spécificités du modèle

Le modèle de simulation de mobilité résidentielle que nous proposons, est d'une part une extension du modèle VisualSimores [50] et de l'autre part une intégration de concepts d'un modèle markovienne de prédiction spatiale [75].

Les améliorations apportées dans notre modèle se résument principalement dans les points suivants :

1. Modification légère des nomenclatures des données
2. Extension du modèle de projection de population

3. Deux images de références au lieu d'une seule pour construction de la matrice de transition
4. Ajout d'une nouvelle règle de vivre ensemble
5. Une exploration réelle lors de la recherche de logement.
6. Implémentation de chaîne de Markov
7. Implémentation orienté agent du modèle
8. Intégration de la concurrence et parallélisme entre les agents ménages

Les points suivants présentent avec plus de détail les améliorations apportées dans notre modèle :

- Les types de ménages ont été adaptés. Dans notre modèle, on trouve Personne seule, famille monoparentale, famille avec enfants, famille sans enfants. Même s'il s'agit d'une adaptation légère. Pourtant elle est nécessaire car les enquêtes ménages au niveau du Maroc ont leurs propres nomenclatures par rapport aux types de ménages. De même les taux démographiques ont été adaptés. Il y a le taux de divorce, de départ de jeune de la famille, et taux de mariage. Ils ont été adaptés pour la même raison de nomenclatures qui est issues des différences de société. Les français utilise le terme de vie en couple, les marocains vivent en famille.
- Le modèle de projection des ménages a été étendu en ajoutant une équation algorithmique (voir l'équation 23) sur le taux de naissance qui s'applique sur les familles sans enfants(FSE). De ce fait, une part de ménages sans enfants, dans notre modèle, vont avoir des naissances et évoluer donc dans le cycle familiale en devenant des familles avec enfants (FAE).
- Le modèle VisualSimores repose sur l'utilisation d'une seule carte spatiale de configuration initiale. Pour la construction de la matrice de transition, il utilise un algorithme de génération de table de contingence spatiale se basant sur une seule carte de configuration initiale. Le partitionnement utilisé dans l'algorithme est basé sur une méthode de stratification notamment le sondage en grappes à probabilités égales. Cette façon de faire, ajoute plus de complexité au modèle et exige une validation de la méthode de stratification. Pour remédier à cela, dans notre modèle, deux cartes successives au lieu d'une carte de configuration initiale ont été utilisées. Cette idée a été prise du travail de modélisation et simulation de dynamique spatiale utilisant les chaînes de Markov et automate cellule [75]. Après la revue d'autres travaux de recherche, il s'est avéré que cette technique est très reconnue pour la construction de la matrice de transition [76] [77].

- L'algorithme de règles de transitions spatiales dans le modèle VisualSimores, utilise des règles de transitions instrumentalisant le voisinage et le potentiel d'attraction. Son principe repose sur le concept d'état dominant dans le voisinage de cellule en question. En fait, une cellule transite de son état actuel à l'état dominant de son voisinage. L'algorithme conditionne aussi la règle de transition par le potentiel d'attraction de la cellule en question qui devrait dépasser un certain seuil paramétrable dans le simulateur. Dans notre modèle, l'algorithme de règles de transitions spatiales (Figure 13) a été traduit différemment en introduisant et implémentant le concept de chaîne de Markov. Le modèle s'inspire d'un modèle markovien de prédiction de dynamique spatiale [75] lequel repose sur l'utilisation de deux cartes initiales et présente les concepts théoriques essentiels. L'utilisation de ces principes décrits dans « le sous modèle de chaîne de Markov », permettent la génération des matrices et vecteurs d'états des instants initiaux et futures et ensuite faciliter l'exécution de l'algorithme de règles de transitions spatiales.
- Pour améliorer le même algorithme de règles de transitions spatiales de notre modèle, en rapport avec l'étalement urbain qui manifeste principalement en périphérie de la ville, une nouvelle règle de transition a été appliquée sur les cellules ayant l'état zone constructible, de telle sorte qu'une cellule zone constructible ne transite vers le nouvel état (voir l'équation 10) que si elle est à proximité de cellules maisons ou appartements. Cette règle traduit la volonté humaine de vivre ensemble.
- L'algorithme régissant les déplacements résidentiels des ménages dans le modèle VisualSimores utilise une exploration figée de logements, de telle sorte que la recherche d'un logement est effectuée dans un voisinage constant. Si un ménage ne trouve pas de logements convenables dans ce voisinage, l'algorithme considère que le ménage n'a pas trouvé de logement. Or, en réalité, un ménage ne se limite pas à un seul essai de recherche. À chaque fois qu'il ne trouve pas de logements convenables, il grandit son champ d'exploration jusqu'à trouver un logement convenable. Dans notre modèle, l'exploration est rendue flexible et réaliste (voir Figure 16), de telle sorte que le ménage commence par chercher un logement dans le voisinage proche et au besoin il grandit le champ d'exploration jusqu'à trouver un logement convenable où il peut déménager.
- L'algorithme régissant les déplacements résidentiels des ménages dans le modèle VisualSimores traduit l'implémentation des agents à travers une programmation orienté objet qui se caractérise par une exécution en séquence des objets agents. Cette façon d'implémentation ne permet pas d'implémenter la concurrence qui devrait manifester

entre les agents ménages lors de la recherche de logements. La traduction faite à travers une programmation orientée objet peut être due à deux raisons. La première raison est la simplification du développement du modèle vu que la programmation orientée agent demande plus d'effort et une implication d'une plateforme de développement de systèmes multi-agent. La deuxième raison peut-être la confusion faite par les programmeurs familiers avec la POO entre la notion d'agent et la notion d'objet comme déjà discuté dans la partie « Systèmes multi-agents du chapitre généralités ». L'implémentation faite dans notre modèle est entièrement orientée agent où les agents ménages réjouissent d'un parallélisme qui leur permet de manifester le comportement de concurrence lors de la recherche d'un nouveau logement. Cela a été concrétisé grâce au recours à la plateforme Jade pour la spécification et le développement des agents ménages et à la notion de sémaphores pour l'implémentation de la gestion d'accès aux objets logements de l'automate cellulaire. Ainsi, chaque agent ménage dans notre modèle est représenté par un Thread qui lui permet de s'exécuter en parallèle aux autres agents.

Le tableau suivant résume les points hérités et améliorés dans notre modèle par rapport au modèle VisualSimores.

	VisualSimores	Notre modèle	Améliorations
Parallélisme	_	***	ajout d'agents jade
Concurrence	_	***	ajout de sémaphores
Support d'émergence de zones périphériques	***	***	qualité assurée par les 2 modèles
Prédiction d'espace	**	***	modèle probabiliste au lieu de règles IF-THEN
Exploration intelligente	*	***	exploration progressive
mobilité résidentielle	***	***	Réseau bayésien hérité
projection démographique	**	***	héritée et améliorée
implémentation agent	_	***	développement avec la plateforme Jade (AC-SMA-POA)

Légende : *** : fortement ; ** : moyennement ; * : faiblement ; _ : non supporté(e) ou non décrit(e)

3.6. Conclusion

Nous pensons que notre modèle apporte une solution importante à l'étude prospective de la mobilité résidentielle et l'expansion urbaine qui lui est liée. Ce qui est intéressant à propos de la modélisation, c'est que notre modèle est déployé moyennant une approche de simulation mixte ascendante qui considère la ville, dans laquelle ces deux phénomènes ont lieu, comme un système émergent et auto-organisé dont la dynamique globale est le résultat d'un ensemble de comportements résidentiels individuels (notamment la mobilité résidentielle et choix de logement) des plus petites unités qui sont les ménages et les logements.

CHAPITRE 4. IMPLÉMENTATION ET EXPÉRIMENTATION

Pour la validation de la conception de notre modèle proposé [55] [78], nous avons pensé à son implémentation. Le chapitre courant mis en évidence les technologies choisies pour l'implémentation, une description du développement, les écrans du simulateur et du modèle informatique développés, les sources de données utilisées dans le simulateur et l'expérimentation réalisée par l'application.

4.1. Choix des technologies

4.1.1 JAVA

Nous choisissons le langage de programmation Java pour l'implémentation de notre simulateur et modèle informatique de simulation de mobilité résidentielle. Il est orienté objet et l'un des plus populaires langages de programmation dans cette présente décennie. Le langage Java a été développé à l'origine par James Gosling dans la société Sun Microsystems (qui a été acquis après par la société Oracle Corporation) et publié en 1995 comme composant principal dans la plateforme Java de Sun Microsystems. Le langage avait à l'origine le nom oak qui désigne un arbre de chêne qui se trouvait devant le bureau de Gosling. Le langage a pris finalement le nom Java qui désigne un type de graine du café. La syntaxe de java a été dérivée de celles des langages C et C++ dans un but de le rendre familier entre les développeurs d'applications.

Parmi les caractéristiques du langage Java, qui ont été derrière son choix, comme élément essentiel dans le développement de notre modèle de simulation de mobilité résidentielle, on trouve :

- **Java un savoir commun** : Le langage Java est très connu au niveau de l'université marocaine, le choisir permet d'un côté de tirer utilité des ressources humaines qualifiées et d'un autre côté concentrer l'effort et le temps sur la problématique.
- **Un support aux outils SMA** : Java est l'un des langages les plus populaires au monde, en plus, la grand part des plateformes de développement de systèmes multi-agent est implémenté en java [79].
- **une programmation orienté objet** : le langage java support principalement le paradigme de programmation orienté objet, il utilise principalement le concept de

classe, d'objet, d'héritage, de polymorphisme et renforce la sécurité via le concept d'encapsulation.

- **faible dépendance aux architectures d'ordinateur** : Un programme java écrit dans une machine Windows peut être facilement exécuté sur une machine par exemple Linux grâce à l'utilisation de la Java Virtual Machine. Java fait cela en transformant le code en bytecode au lieu de code machine. Pour exécuter le programme sur n'importe quel processeur, la JVM interprète le bytecode et transforme le en code machine.
- **Un langage simple** : le langage Java offre presque les mêmes capacités, comme ces prédécesseurs C et C++, mais il est beaucoup plus simple que ces derniers vu la non utilisation de pointeurs, la syntaxe conviviale, sa richesse en librairie et sa ramasse muette.
- **Un langage populaire** : le langage à une grande communauté informatique, une documentation dans plusieurs langues y compris la langue française. Il est très populaire particulièrement pour les applications client-serveur, voir la Figure 18.
- **Un langage générique** : qui grâce au support de polymorphisme et de la liaison dynamique, il permet de développer des applications génériques, réutilisables et extensibles.

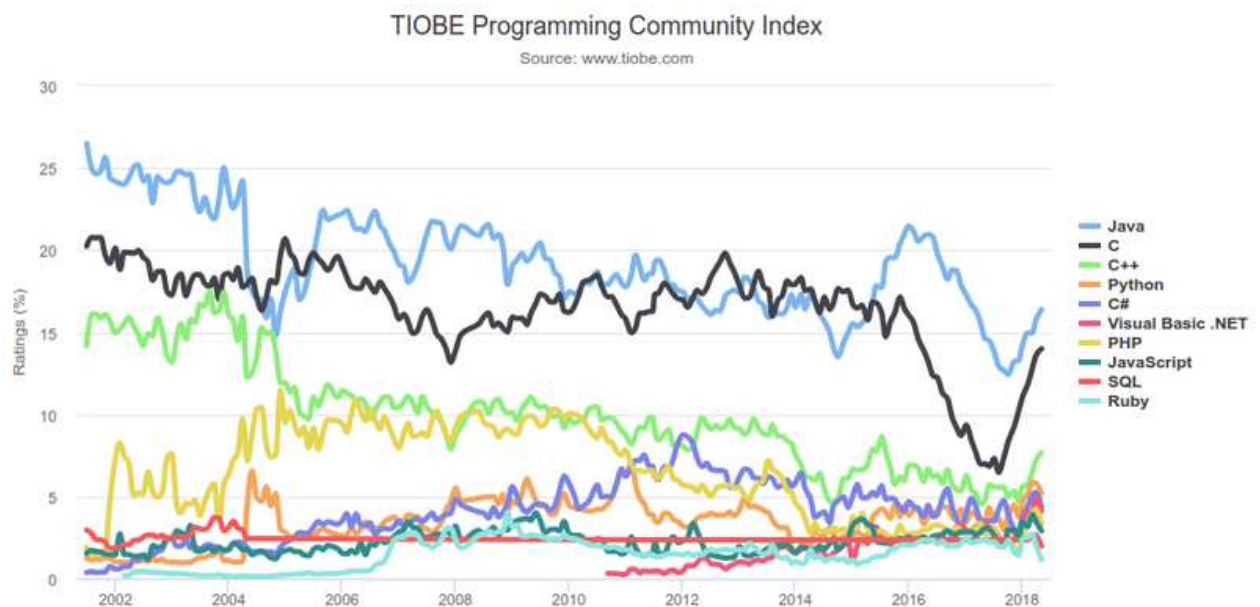


Figure 18 indice de popularité des langages

4.1.2 Plateformes agent

La recherche dans le domaine de systèmes multi-agent est active. Le développement de nouvelles plateformes de SMA est en croissance continue. On parle de centaines d'outils de

développement dédiés aux systèmes multi-agents. Certains outils ont une durée de vie courte et une utilisation spécifique. Vu l'absence de standards et à cause de la multitude d'utilisations pour lesquelles ces outils ont été développés, il est très difficile de les comparer explicitement.

Pourtant les chercheurs, pour classer les outils SMA, réduisent le nombre d'outils et le nombre de critères. Le travail de [79], l'un des travaux les plus élaborés et cités, réduit le nombre de critères en cinq caractéristiques que les utilisateurs considèrent le plus lors du choix d'un outil SMA (langage de programmation requis pour le développement du modèle, le système d'exploitation requis pour exécuter l'outil, type de licence régissant la plateforme, le domaine principal pour lequel l'outil a été conçu, le degré du support à l'utilisateur de la plateforme).

Nous présentons dans ce qui suit cinq plateformes de développement de SMA que nous avons sélectionnées vu leur popularité entre les chercheurs. Des présentations détaillées des outils SMA peuvent être trouvés dans les travaux de [79] [80].

NetLogo : est une plateforme de haut niveau, existe sous deux formes de licence GNU GPL et une licence commerciale, offrant un simple langage de programmation, un environnement de modélisation modérée par des interfaces graphique et une documentation compréhensive. Développé par l'université Northwestern. Son domaine primaire est l'enseignement et permet de développer des systèmes multi-agent sans pour autant avoir des connaissances en programmation.

MASON : MASON (Multi Agent Simulator Of Neighborhood or Networks) est un environnement de simulation écrit en Java développé dans l'université George Mason sous licence AFL (Academic Free Licence). La librairie est simple mais moins extensible que les autres similaires librairies. Le projet a une documentation détaillée, plusieurs exemples d'applications et il demande plus de compétences de programmation Java que NetLogo.

JADE : JADE (Java Agent DEvelopment Framework) facilite le développement des systèmes multi-agent et elle est conforme aux spécifications FIPA. Le Framework dispose d'un ensemble d'outils graphiques qui simplifie le débogage et le déploiement d'applications de systèmes multi-agent.

AgentBuilder : est une plateforme commerciale qui permet de booster le développement d'agents intelligents et applications centré agent. Il a été développé par Reticular Systems Inc en JAVA. Elle supporte l'architecture BDI pour la conception des agents et le langage KQML pour la communication.

Madkit : MadKit (Multi-Agent development Kit), est une plateforme générique de développement de systèmes multi-agents. Il est conçu comme une librairie Java légère pour le

développement des applications distribuées et des simulations basées sur le paradigme agent. La plateforme existe sous une licence française CeCILL-C (compatible avec de la licence LGPL).

4.1.3 JADE

Nous choisissons JADE pour implémenter notre module système multi-agent de notre modèle de simulation de mobilité résidentielle. Cette plateforme générique, aisément extensible, disponible sous une licence convenable (qui est GNU LGPL v2) est entièrement développée en JAVA. Le logiciel est open source et est à l'origine développé par *Telecom Italia* et distribué avec une licence LGPL v2. Il requiert au minimum la version 5 de JAVA (JRE ou bien JDK).

Plusieurs caractéristiques de la plateforme Jade ont été derrière son choix comme élément essentiel dans le développement de notre modèle de simulation de mobilité résidentielle.

- **Jade est aisément extensible** : Jade est flexible et aisément extensible (chose qui manque par exemple dans NetLogo). Jade donne la liberté pour la conception d'agents. L'utilisateur peut concevoir des agents BDI selon son propre architecture comme il a aussi le choix d'utiliser un outil implémentant une architecture propre à Jade (i.e., Jadex).
- **Une interface 'in-process interface'** : l'interface 'in-process' permet le lancement des agents à travers du code intégré dans l'application. Tout le contrôle et la configuration sont écrits en code automatisé au lieu de l'utilisation de l'interface graphique Jade pour le lancement de l'application. Les simulations répétées deviennent très flexibles (les commandes de gestion de lancement se font en arrière-plan) et permettent de gagner énormément de temps.
- **Jade est générique** : Un autre important point est que la plateforme Jade est générique [81], elle n'est pas spécifique à un cas particulier de systèmes multi-agent. Ce qui permettra la réutilisation ou l'extensibilité d'existants modèles ou plateformes de simulations pour créer d'autres modèles spécifiques à de nouveaux problèmes urbains.
- **Licence Gnu LGPL** : jade offre une licence LGPL motivante pour le développement de modèles informatique de simulation propriétaires sans pour autant rendre le code source open source. Cette licence de Jade est en harmonie avec l'objectif à moyen terme de développement d'une plateforme de simulation des systèmes urbains.

- **Jade supporte la distribution de l'application** : ce qui signifie que l'application peut être distribuée à travers divers machines (qui ne nécessite pas d'avoir le même système d'exploitation).
- **Une gestion simple mais efficace du cycle de vie des agents** : Lorsque des agents sont créés, ils sont attribués automatiquement un global unique identifiant et une adresse de transport qui servent à les enregistrer avec le service de page blanche de leur plateforme. La gestion locale ou à distance de cycles de vie des agents peut être effectuée à travers des API et outils graphiques (à travers des commandes pour créer, suspendre, reprendre, migrer, cloner et tuer).
- **Une intégration avec divers technologies web** : les technologies web comme JSP, servlets, applets et les services web. La plateforme peut être aussi facilement configurée pour surpasser les pare-feu et les systèmes NAT.

4.2. Description du développement

4.2.1 Configuration de l'ordinateur

L'application intégrant le modèle proposé est développée avec le langage de programmation JAVA moyennant l'environnement de développement intégré Eclipse Indigo. Le framework JADE a été utilisé pour spécification des agents dans l'application. L'application est testée en utilisant le système d'exploitation Windows 7 avec un processeur Intel core de duo et une fréquence d'horloge d'environ 2.2 GHz avec 4 Go de mémoire RAM.

4.2.2 Modules de l'application

L'application contient environ six milles lignes de code organisées en paquetages. Ce qui favorise l'extensibilité et la réutilisation de l'application. La liste de paquetages contient :

- "bn" (baysien network) : le package réseau bayésien.
- "ca" (cellular automata) : le package automate cellulaire.
- "mc" (markov chain) : le package des chaines de Markov.
- "grid" : le package grille du réseau cellulaire.
- "gui" (graphic user interface) : le package des interfaces graphiques
- "params" : le package des données et paramètres statistiques.
- "sma" : le package systèmes multi agents

4.3. Application de simulation

L'application contient une barre de menu composée de six menus (Fichier, Affichage, Saisie, Configuration, Exécution, et ?), un espace de travail divisé en deux parties : une partie gauche où la cartographie de la zone d'étude sera affichée et une partie à droite prévue pour afficher l'évolution de la simulation dans une table.

4.3.1 L'interface graphique

La simulation de scénarios du modèle de mobilité résidentielle proposé est rendu facile et simple grâce à l'interface graphique de l'application. La Figure 19 expose l'interface graphique principale de l'application.

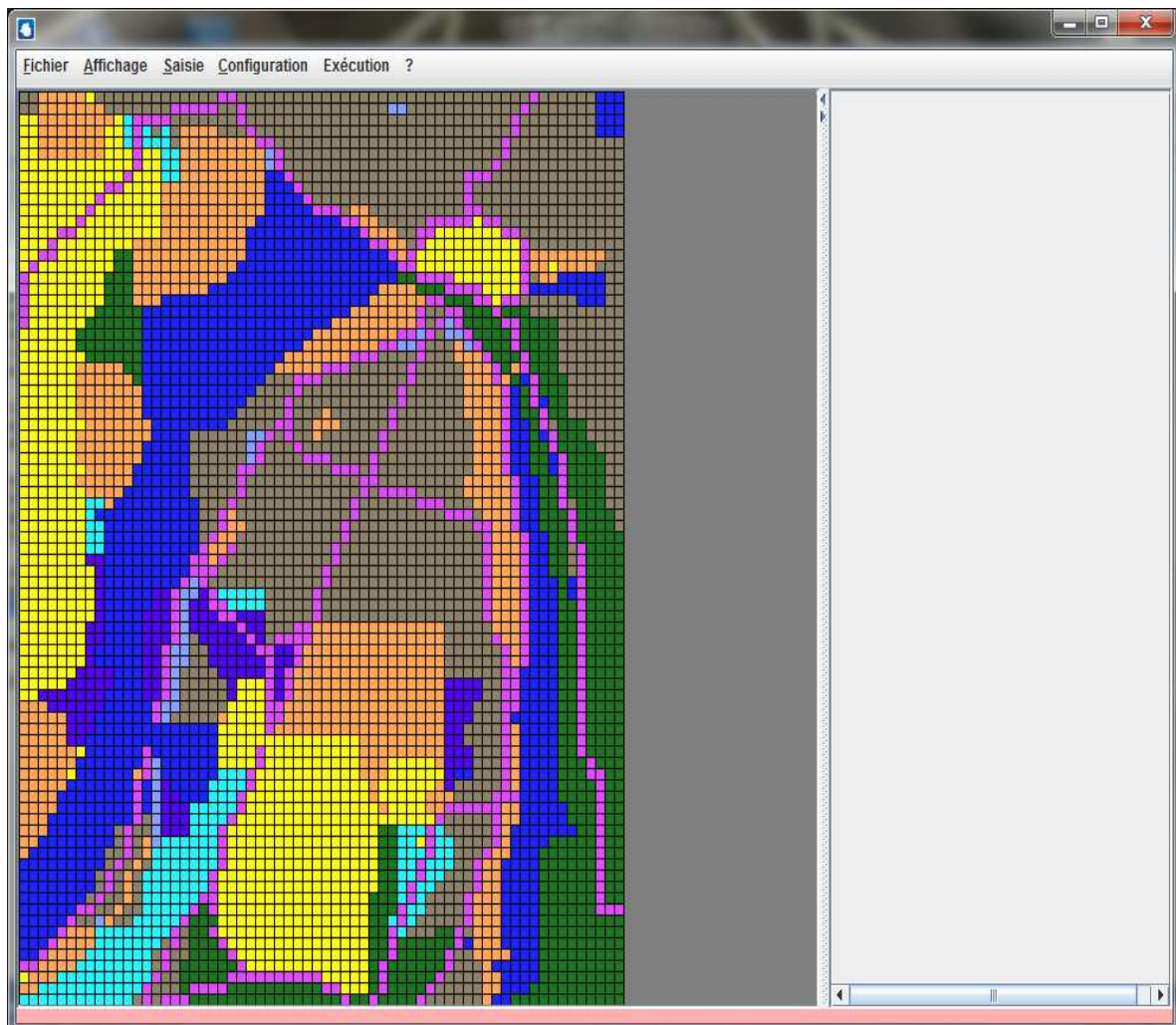


Figure 19 Interface graphique de l'application chargeant une carte de l'occupation du sol d'une zone urbaine.

4.3.2 Menus

Les menus de l'application permettent une navigation facile entre les différentes fonctionnalités. L'utilisation des raccourcis simplifie encore plus l'interaction homme machine.

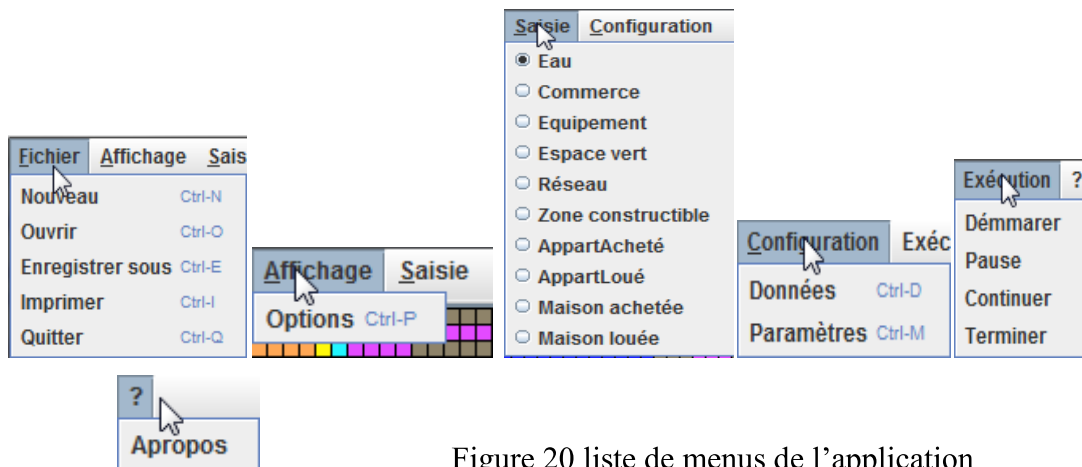


Figure 20 liste de menus de l'application

4.3.3 Paramètres d'affichage de la grille par défaut

Pour afficher la boîte de dialogue des paramètres d'affichage de la grille par défaut de l'application, aller dans Affichage>Options où utilisez le raccourcis (Ctrl+P).

Les paramètres d'affichage sont ajustables, l'utilisateur utilisera cette boîte de dialogue ci-dessous pour définir et ajuster :

- ❖ la résolution spatiale de la cellule (coté de la cellule);
- ❖ la margeXY de la grille par rapport au point de référence (0,0) du conteneur ;
- ❖ L'épaisseur et la couleur du contour de la cellule ;
- ❖ La couleur de remplissage de la cellule.

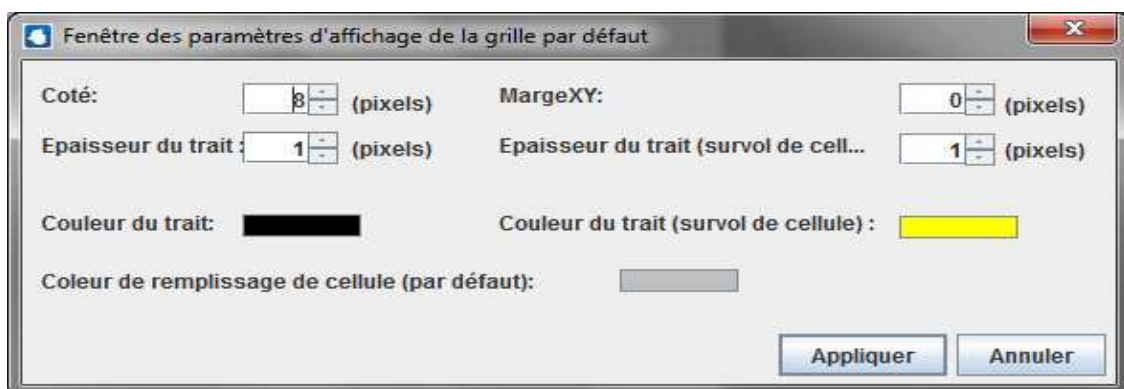


Figure 21 des paramètres d'affichage de la grille

4.3.4 Spécification des données et paramètres de la simulation

Pour afficher la boîte de dialogue de spécification des données et paramètres de l'application, aller dans Configuration>Paramètres où utilisez le raccourcis (Ctrl+T).

Cette boîte de dialogue permet de modifier et ajuster tous les paramètres et données qu'il faut prédéfinir avant de commencer la simulation. Les modifications ne seront produites que si la cartographie de la zone d'étude est déjà chargée.

L'utilisateur doit définir :

- ❖ Les paramètres démographiques (le taux de départ de jeunes, de divorce et de mariage) ;
- ❖ Les paramètres spatio-temporels (la résolution spatiale l'automate cellulaire et la durée totale de simulation) ;
- ❖ Les paramètres des états statiques (la couleur de l'occupation du sol correspondante à chaque état statique) ;
- ❖ Les paramètres des états dynamiques (la couleur de l'occupation du sol et la qualité environnementale de chaque état dynamique) ;
- ❖ Les paramètres socio-spatio-économiques (l'effectif, l'âge, le niveau moyen de revenu, la proportion de propriétaire de maison, la proportion de locataire de maison, la proportion de propriétaire d'appartement, la proportion de locataire d'appartement pour chaque type d'agent résidentiel).

Spécification des données et paramètres de la simulation

Paramètres démographiques du SMA

Taux de départ:

Taux de divorce:

Taux de mariage:

Paramètres spatio-temporels

Résolution spatiale: mètres

Durée totale de la simulation: années

Paramètres des états statiques

Nom de l'état	Couleur à affecter
Eau	
Equipements	
Espace commer...	
Espace vert	
Réseau routier ou ferré	
Zone constructible	

Paramètres des états dynamiques

Nom de l'état	Couleur à affecter	Qualité environnementale
Maison lou...		<input type="text" value="0.6"/>
Maison ache...		<input type="text" value="0.6"/>
Appartement lo...		<input type="text" value="1"/>
Appartement ach...		<input type="text" value="1"/>

Paramètres socio-spatio-économiques

Type d'agent	Effectif	Age moyen	Niveau de re...	Prop.Maison...	Loc.Maison(...)	Prop.Appar(...)	Loc.Appar(%)
Personnes ...	20	29	Faible	0	0	0	100
Famille san...	30	36	Moyen	28	72	0	0
Famille avec...	50	41	Elevé	78	22	0	0
Familles mo...	50	48	Elevé	12	88	0	0

Appliquer Annuler

Figure 22 Paramétrage des données et paramètres statistiques de la simulation

4.3.5 Chargement de la cartographie de la zone d'étude

Le chargement de la cartographie de la zone d'étude se fait via un fichier d'extension ".mit". Pour faire cela, aller dans Fichier>Ouvrir ou bien utiliser le raccourci (Ctrl+O).

Une boîte de dialogue s'affiche pour ouvrir le fichier ".mit" contenant la cartographie de la zone d'étude.

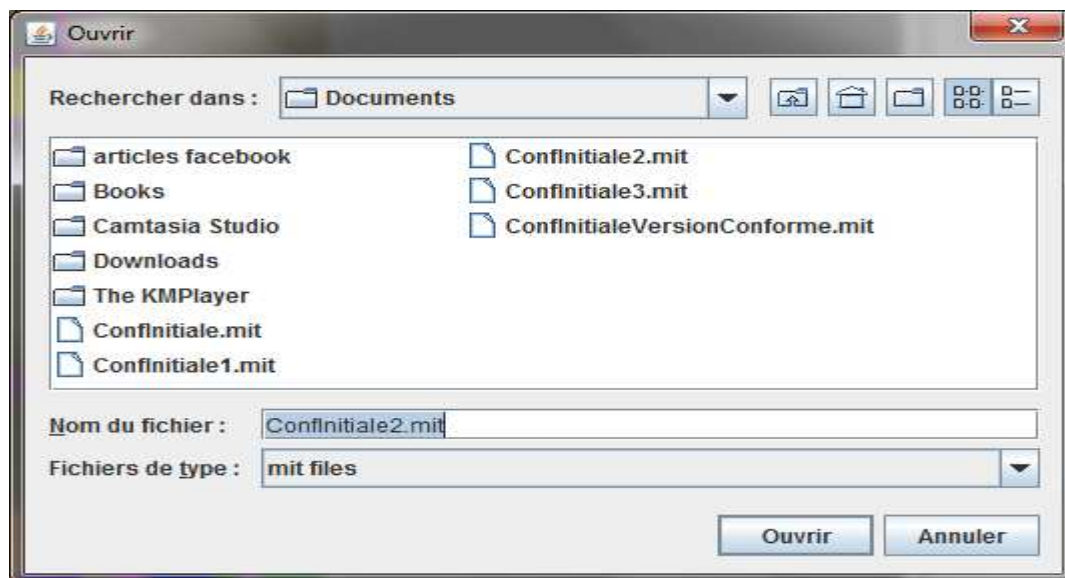


Figure 23 boîte de dialogue d'ouverture de fichier

Une fois que vous cliquez sur ‘ouvrir’.Un parseur interne vérifie la syntaxe du fichier et affiche un message de confirmation de vérification et de chargement de fichier.

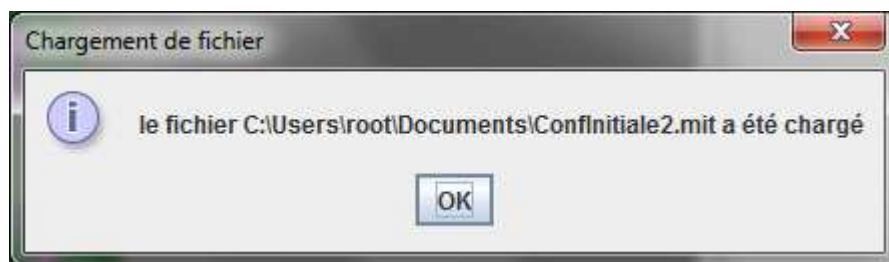


Figure 24 message de confirmation de chargement de carte

4.3.6 Exécution

Pour commencer l'exécution de l'application, aller dans Exécution>Démarrer. La simulation de la zone d'étude commence en prenant en comptes les paramètres préalablement définis. Le résultat produit est mis à jour dans la grille.

4.3.7 Enregistrement du résultat de simulation

L'enregistrement de résultat de simulation se fait sous forme d'un fichier ‘mit’. Pour faire cela aller dans Fichier>Enregistrer sous ou bien utilisez le raccourcis (Ctrl+E).

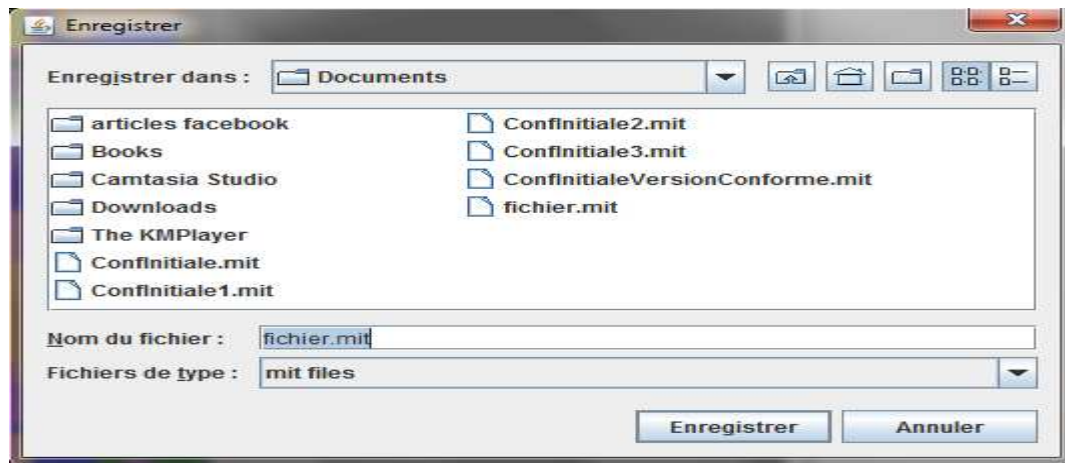


Figure 25 boîte de dialogue d'enregistrement de fichier

4.3.8 Editeur de carte imbriqué

C'est une fonctionnalité optionnelle, elle permet de modifier une carte ou bien créer une carte entière. L'utilisateur choisit dans le menu Saisie le type d'habitat qu'il veut ajouter comme dans la figure.

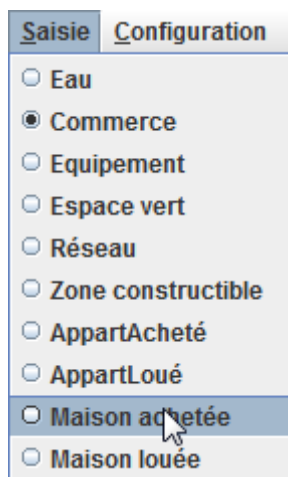


Figure 26 menu saisie

Il choisit ensuite le carré représentant la cellule et clique dessus pour modifier l'état de la cellule vers ce nouveau type de l'occupation du sol. Dès qu'il complète la carte, il peut désormais l'enregistrer sous forme d'un fichier d'extension "mit" ou bien commencer la simulation.

4.4. Sources de données du modèle

Pour pouvoir simuler la mobilité résidentielle d'une ville marocaine moyennant le modèle. Il y a besoin à différents types de données avec des formats prédéfinis. Le modèle pour simuler la mobilité résidentielle par exemple depuis 2007 jusqu'à 2016, il aura besoin de deux cartes de l'occupation du sol de la zone urbaine étudiée prises dans des années 2006 et 2007 en plus d'une

carte optionnelle de 2016. Il aura besoin également d'indicateurs démographiques et des données socio-économiques des ménages de la zone urbaine étudiée de l'année 2007.

4.4.1 Sources de données

Quatre principales sources se présentent à savoir, le SIG de l'HCP, les images satellitaires, l'enquête nationale sur les niveaux de vie de ménages et l'enquête nationale démographique.

Le système d'information géographique de l'Haut Commissariat au Plan et les images satellitaires peuvent être utilisés pour construire les cartes de l'occupation du sol nécessaires pour la réalisation des simulations de la mobilité résidentielle d'une quiconque zone urbaine étudiée. L'HCP dispose de planches communales qui constituent le SIG HCP du Territoire du Maroc. De telles planches contiennent des objets géo-référencés comme les îlots urbains, les boulevards, les rues, les principaux équipements socio-économiques à savoir, les mosquées, les centres hôpitaux, les écoles etc. Pour les images satellitaires, la contrainte de résolution des images s'impose. Autant que le satellite a une très haute résolution, autant qu'il identifie les logements (maisons et appartement). Pour pouvoir identifier les logements dans les cartes satellitaires et ensuite passer aux cartes propres du modèle, il convient d'utiliser des images satellitaires de très haute résolution comme Quickbird (0.6m), GeoEye-2 (0.34m), WorldView-3 (0.31m), KOMPSAT-3A (0.55m), IKONOS (0.82m), SkySat-1 (0.9m) et SkySat-2 (0.9m). Par exemple, l'image satellitaire Quickbird a une résolution de 0.6 ce qui signifie qu'un pixel représente en réalité spatiale 0.6 mètres carrés. Un logement ayant une superficie de 10 mètres carrés va être représenté donc dans l'image par environ seize pixels. Il apparaît alors clair que ces images satellitaires sont assez suffisantes pour construire les cartes de l'occupation du sol de notre modèle.

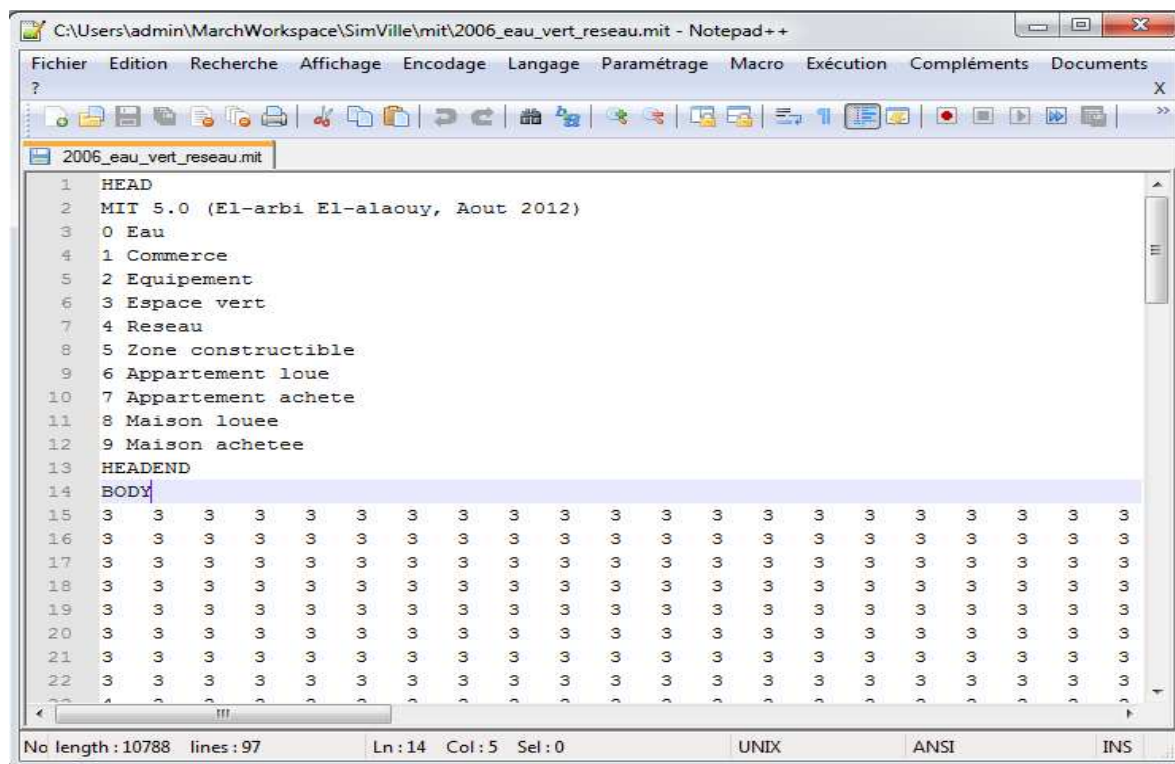
L'enquête nationale sur les niveaux de vie de ménages et L'enquête nationale démographique peuvent être utilisées pour construire les données ménages et les indicateurs démographiques de notre modèle. L'enquête nationale sur les niveaux de vie de ménages a comme objectifs principaux la détermination de la situation socio-économique globale de divers groupes sociaux et la constitution d'une base de données sur l'accès des ménages aux services sociaux de base à savoir, l'alphabétisation, l'éducation, le logement, la santé, l'emploi etc. L'enquête utilise un échantillon de taille de 7200 ménages (4320 urbains et 2880 ruraux). Elle se base sur trois questionnaires qui sont un questionnaire ménage, un questionnaire dépenses et un questionnaire douar. La première enquête de son genre est réalisée au cours de la période 1990/1991. L'enquête a été réalisée ensuite deux fois au cours des périodes 1998/1999 et 2006/2007. L'enquête nationale démographique a été conçue pour objectif d'appréhender la compréhension

des phénomènes démographiques à savoir, la natalité, la mortalité et la migration. Elle met en axe d'intérêts aussi les mécanismes sous-jacents particulièrement la fécondité, la nuptialité, la mortalité par âges et les flux migratoires. L'enquête est faite sur un échantillon de près de 90 milles ménages réparties sur le Territoire du Maroc. Elle utilise deux questionnaires. Le premier dresse le portrait démographique et socioéconomique de la population alors que le deuxième relève les principaux phénomènes survenus dans la population notamment, la naissance, le décès et les migrations. L'enquête a été réalisée irrégulièrement au cours de deux périodes : en 1986/1988 et 2009/2010.

4.4.2 Formats des données du modèle

Dans notre modèle, les cartes de l'occupation du sol sont conçues comme des grilles 2D de cellules qui représentent des objets ou parties d'objets de zones routières et ferrées, rivières ou lacs, espace vert et forêts, immeubles commerciaux et d'équipements, maison en propriété, maison en location, appartement en propriété, appartement en location ou zone constructible. Les cartes sont représentées aussi par des fichiers ayant une structure prédéfinie et une extension '*.mit' comme dans la Figure 27. Le modèle accepte deux fichiers de cartes de l'occupation du sol et génère un fichier qui est la sortie résultat de la simulation.

Les données socio-économiques des ménages sont représentées sous forme d'enregistrements d'une table. En extrayant les données depuis l'enquête sur les niveaux de vie ménages, chaque ménage est représenté par un enregistrement contenant des données notamment l'identifiant du ménage, l'identifiant de région, l'identifiant de province ou préfecture, l'identifiant d'unité primaire, le type de composition du ménage (personne seule, famille avec enfant...), le type de statut d'occupation (propriétaire, locataire, loge gratuitement...), le type de logement (maison, appartement...); le revenu annuel moyen par ménage et l'âge du chef de ménage. À partir de l'enquête nationale démographique, l'extraction des données démographiques doit être faite de telle manière qu'on ait des indicateurs démographiques qui sont de l'ordre de la ville ou commune urbaine étudiée. Il s'agit notamment de variables taux de départ des jeunes de leurs familles, taux de mariage de jeunes, taux de divorce, taux de naissance, et l'espérance de vie.



```

C:\Users\admin\MarchWorkspace\SimVille\mit\2006_eau_vert_reseau.mit - Notepad++
Fichier Edition Recherche Affichage Encodage Langage Paramétrage Macro Exécution Compléments Documents
?
2006_eau_vert_reseau.mit
1 HEAD
2 MIT 5.0 (El-arbi El-alaouy, Aout 2012)
3 0 Eau
4 1 Commerce
5 2 Equipement
6 3 Espace vert
7 4 Reseau
8 5 Zone constructible
9 6 Appartement loue
10 7 Appartement achete
11 8 Maison louee
12 9 Maison achetee
13 HEADEND
14 BODY
15 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3
16 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3
17 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3
18 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3
19 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3
20 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3
21 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3
22 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3
No length : 10788 lines : 97 Ln : 14 Col : 5 Sel : 0 UNIX ANSI INS

```

Figure 27 structure de la carte de l'occupation du sol du modèle

4.5. Expérimentation

La section courante présente les résultats de la simulation de notre modèle ayant comme objectif la simulation de la mobilité résidentielle des villes marocaines. La simulation démarre avec un nombre d'agents ménages, de logements et de cartes représentant la zone urbaine étudiée. Comme il a été difficile d'acquérir les données géographiques réelles de la ville de Salé. On présente ici des résultats de simulation de notre modèle de simulation de la mobilité résidentielle que nous avons développé. Le scénario simulé est un scénario de la croissance démographique d'une ville synthétique.

La simulation commence avec un nombre de logements et agents ménages égaux à 216 et 150 respectivement. Ce qui signifie qu'il existe un certain nombre de logements vacants au début de la simulation. Les ménages ont des caractéristiques qui forment des profils distincts qui alimentent les choix résidentielles des ménages en ce qui concerne la mobilité résidentielle et le choix de logement.

La population croit annuellement en termes de nombre de ménages. La croissance est gouvernée par des indicateurs démographiques issus d'enquêtes démographiques notamment le taux de naissance, le taux de départ, le taux de divorce, le taux de mariage et l'espérance de vie ayant respectivement les valeurs 0.7%, 0.2%, 0.5%, 0.5% et 70 ans. Les résultats sont calibrés

moyennant une distribution de types de logements par catégories de ménages comme a été réalisé par les auteurs de [46].

La Figure 28 présente les cartes de la ville. Les cartes représentent deux années successives 2006 et 2007.

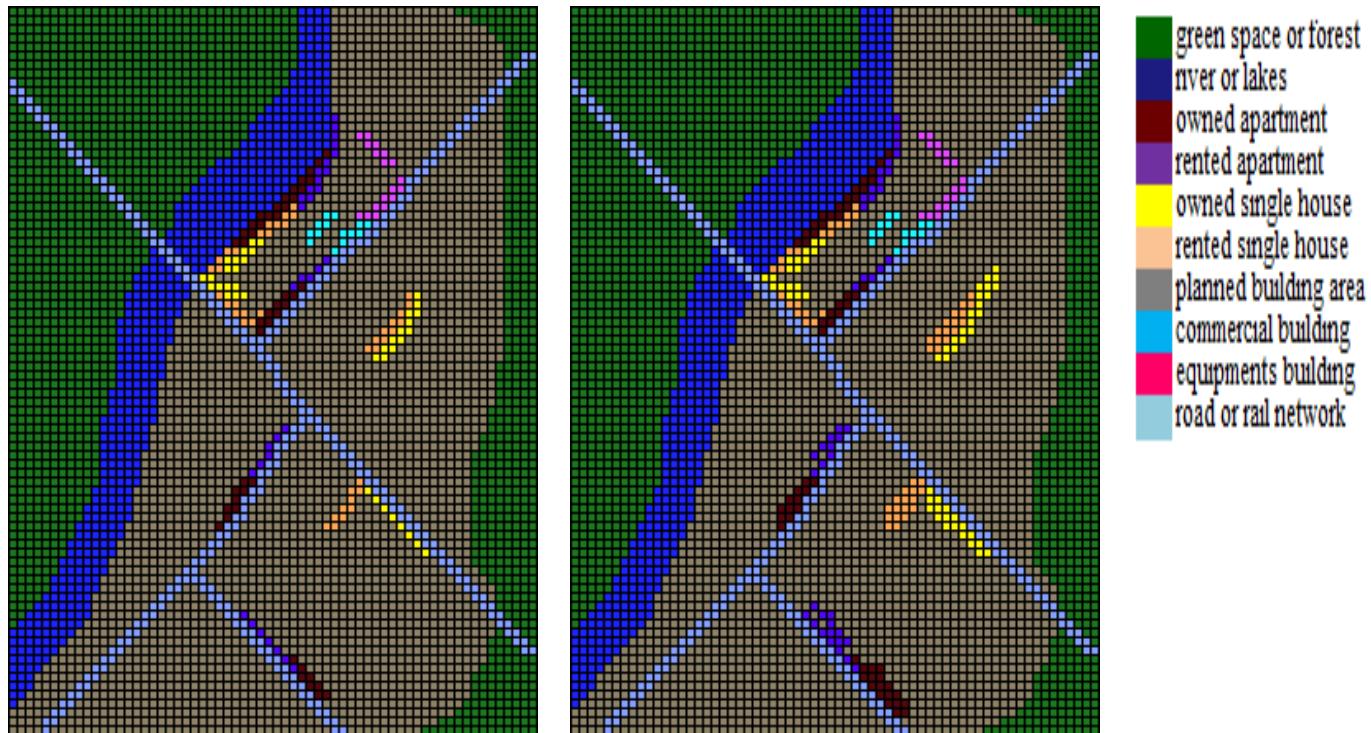


Figure 28 Les cartes 2006 et 2007 de la ville

La matrice de transition et la distribution de probabilité à l'étape initiale sont calculées à partir de ces cartes. En se basant sur les principes de base de chaîne de Markov décrites dans le sous modèle de chaîne de Markov, on calcule la matrice de transition et la distribution de probabilités de l'étape suivante; et en conséquence, on projette annuellement les dynamiques spatiales en termes de zones bâties comme expliqué avant dans la section d'automate cellulaire et chaîne de Markov.

Après le développement des zones bâties, les ménages (y compris ceux qui ont été générés par le modèle de croissance démographique) commencent leurs choix résidentiels comme décrit dans le sous modèle de système multi agent. Les nouveaux ménages générés cherchent des logements vacants en utilisant le sous modèle de choix de logement qui leur permet d'explorer les logements dans leurs voisinages i.e., districts, quartiers et ville entière. D'autres ménages vérifient leurs satisfactions résidentielles, s'ils ne sont pas satisfaits de leur résidence réelle, ils utilisent le module de choix de logement pour chercher une nouvelle résidence. Ainsi, certains

ménages déménagent dans leur nouvelle résidence, tandis que d'autres restent parce qu'ils ne trouvent pas de logements correspondant à leurs souhaits et désirs.

La simulation itère chaque année sur dix ans. Pourtant des scénarios sur moins de dix ans peuvent être réalisés. La Figure 29 représente les zones bâties prévues après la fin de la simulation. La Figure 30 illustre l'évolution de nombres de ménages et de logements durant les années de simulation. Lors de la première année de la simulation, nous notons que le nombre de ménages est inférieur au nombre de logements. Après la deuxième année, contrairement aux logements, le nombre de ménages augmente rapidement. À la fin de la simulation, le nombre de logements et de ménages est dans l'environ respectivement de 800 logements et 1800 ménages. Ces chiffres ressortent un vrai besoin que pourrait avoir cette ville en termes de logements dans l'horizon des dix années futures. En se basant sur ce résultat de simulation, il apparaît clair que le taux de développement de zones bâties est trop petit par rapport au taux de croissance démographique. Ce résultat du scénario simulé et inattendu, devrait faire mener les décideurs urbains et les planificateurs urbains à revoir et réviser le taux de développement de zones bâties et de formuler une décision urbaine convenable aux besoins de la population future.

Ces résultats, en plus de ceux qui pourraient être extraits en analysant les sorties de la simulation, pourraient aider les décideurs urbains à prendre des décisions urbaines efficaces (en rapport par exemple avec le besoins en habitat, en consommation énergétique des ménages, etc.).

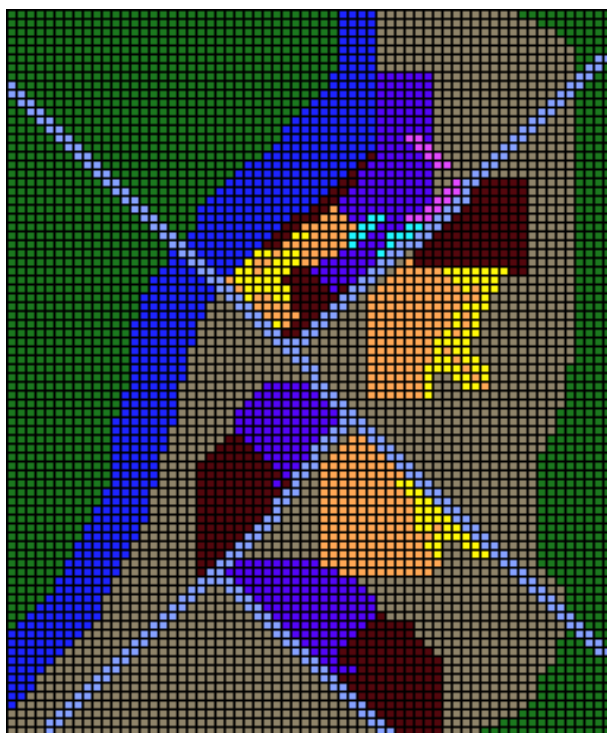


Figure 29 Zones bâties après fin de simulation

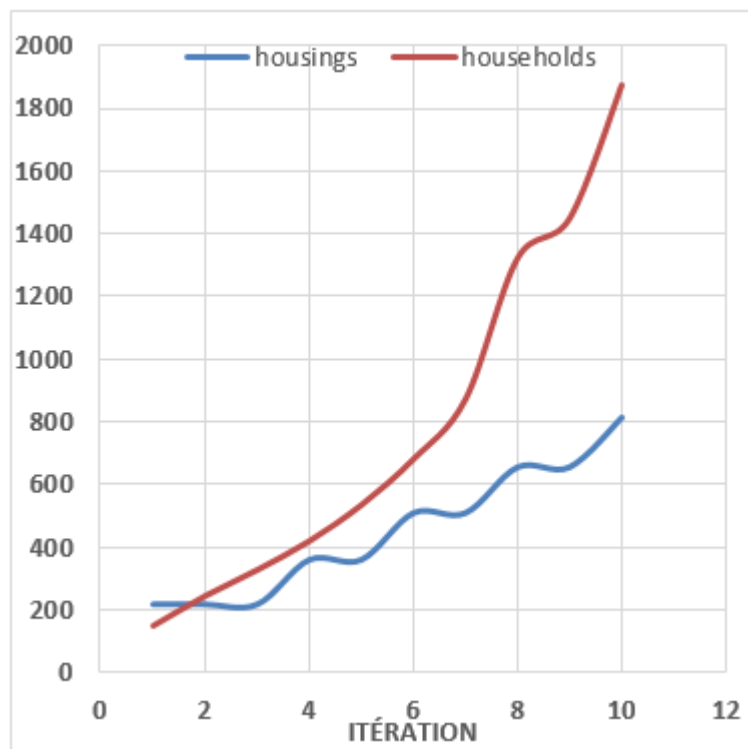


Figure 30 évolution des logements et ménages

4.6. Conclusion

Nous avons présenté le simulateur et le modèle informatique de la mobilité résidentielle qui est notre première implémentation de notre approche d'alliance SMA-AC. Le développement de ce simulateur a été la première étape du processus de concrétisation et de validation de notre approche théorique. Dans cette phase d'implémentation du simulateur, nous étions amenés à une étude des plateformes existantes de développement de systèmes multi-agent et ensuite au choix de la plateforme Jade. Le simulateur et le modèle ont été entièrement développés moyennant le langage Java et à l'aide de la plateforme Jade qui facilite le développement orienté agent. Le travail de l'implémentation a été découpé en trois principales étapes 1) le développement des interfaces graphiques du simulateur 2) le développement du modèle noyau de la simulation de la mobilité résidentielle 3) et intégration de la plateforme Jade pour le codage des agents ménages population de l'espace urbain. En menant à terme le développement du simulateur, et en réalisant des simulations conformes au modèle de mobilité résidentielle, nous montrons clairement que l'approche théorique suivie pouvait se concrétiser dans un domaine où les fondements théoriques dépassent rarement le stade de la théorie.

CHAPITRE 5. MODÉLISATION UML 2.0 DE LA MOBILITÉ RÉSIDENTIELLE

Le chapitre courant présente la modélisation UML 2.0 de notre système d'aide à la décision d'une simulation de la mobilité résidentielle [82]. Étant axée autour d'une approche d'alliance SMA et AC, la modélisation UML 2.0 se propose comme support au développement de modèles de simulation de mobilité résidentielle qui se distinguent à la fois par une dimension spatiale et une gestion des acteurs urbains particulièrement les ménages qui ont des actions résidentielles, notamment la décision de changement de résidence et de choix de logement. Nous présentons d'abord le contexte et l'objectif de la modélisation en premier lieu. Nous exposons ensuite les besoins fonctionnels du système d'aide à la décision et nous finissons avec une description détaillée de notre proposition.

5.1. Introduction

5.1.1 Contexte

La mobilité résidentielle est un phénomène très complexe qui a été étudié au début en tant qu'un système indépendant. Cette tendance est le point de vue classique. Cependant, la tendance actuelle se focalise sur l'interconnexion de la mobilité résidentielle avec d'autres phénomènes urbains avec lesquels elle pourrait donner plus de réalisme et d'efficacité aux modèles informatiques à base de simulation. Ceci permet de soutenir la planification urbaine et la prise de décision. Par exemple, les auteurs de [46] [74] [83] ont développé des modèles de simulation intégrant la mobilité résidentielle, le choix du logement, la croissance démographique et la dynamique spatiale pour simuler la mobilité résidentielle pour différentes durées.

De tels travaux de recherche de mobilité résidentielle décrivent bien les modèles d'un point de vue fonctionnel. Ils décrivent les équations, les fonctions et les algorithmes qui forment le noyau de leurs modèles. Cependant, ce que l'on peut remarquer, est le fait que ces chercheurs se concentrent moins sur la modélisation logicielle de leurs applications de mobilité résidentielle. Partant de cette notice, il nous est apparu judicieux de proposer un travail autour de la modélisation de mobilité résidentielle d'un point de vue logiciel pour servir à surmonter la difficulté de passage depuis la phase de conception mathématique et algorithmique à la phase développement de l'application –implémentation du modèle–. En fait, bien qu'un modèle de

mobilité résidentielle soit assez détaillé de point de vue mathématique et algorithmique, il est indispensable de faciliter la transition à la phase de développement. Le cycle dans la Figure 31 met en évidence les principales phases d'élaboration d'applications. Il distingue entre autres deux phases de modélisation : la phase de modélisation fonctionnelle dans laquelle sont produits les modèles mathématiques et algorithmiques de mobilité résidentielle et la phase de modélisation conceptuelle qui donnera le cadrage conceptuel nécessaire pour faciliter le passage de la phase conception fonctionnelle à la phase de développement.

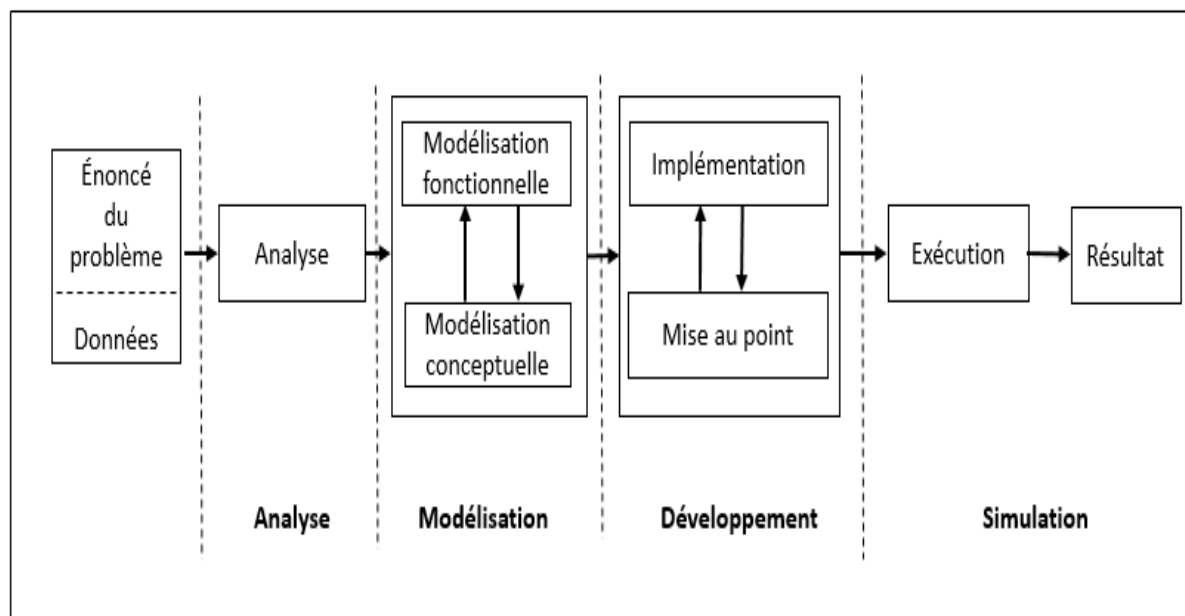


Figure 31 Cycle d'élaboration de système informatique

Le travail que l'on présente ici bénéficie de l'expérience de développement de notre modèle de simulation de mobilité résidentielle [55], il bénéficie aussi de la compréhension et l'appréhension des modèles de simulation cités ici [46] [59] [84].

5.1.2 Objectif du modèle UML 2.0

L'objectif de notre modèle est de modéliser, moyennant la notation UML 2.0, les principaux composants des systèmes de simulation de mobilité résidentielle à base de SMA et d'AC. Ces systèmes contiennent principalement les processus urbains suivants : la mobilité résidentielle, le choix de logement, la croissance démographique et la dynamique spatiale. La modélisation de tels processus urbains n'est pas une simple tâche. L'auteur de [85] a rapporté qu'une grande partie du défi réside dans la modélisation des interconnexions des processus urbains qui résultent d'un complexe comportement spatio-dynamique.

Le modèle UML 2.0 proposé à travers ses six diagrammes fameux, répond aux questions suivantes :

- Comment modéliser l'espace urbain par l'approche AC ?
- Comment modéliser la population habitat d'un espace urbain moyennant l'approche SMA ?
- Comment modéliser la traçabilité annuelle des comportements résidentiels de la population notamment la mobilité résidentielle et le choix de logement ?
- Comment modéliser la traçabilité annuelle des dynamiques de l'espace urbain ?
- Comment modéliser le système urbain en totalité en mettant en évidence l'interconnexion des différents processus urbains ?

5.2. Système urbain à modéliser

5.2.1 Besoins du système

Un système urbain de simulation de la mobilité résidentielle à base de SMA et AC intégrant des processus urbains (notamment la mobilité résidentielle, le choix de logement, la croissance démographique et la dynamique spatiale) définit principalement les besoins suivants :

- Présentation de l'espace urbain par AC;
- Présentation de la population par SMA;
- Description des processus urbains ;
- Interconnexion des processus urbains ;
- Traçabilité des déplacements de la population ;
- Traçabilité de dynamique spatiale ;
- Support de calcul d'indicateurs de décisions

5.2.2 Description détaillée du système

Pour mieux décrire le système urbain à modéliser, nous présentons en détail ces besoins.

- **Présentation de l'espace urbain par un AC** : pour représenter l'espace urbain par un AC, il faut considérer l'espace urbain comme une grille bidimensionnelle composée d'un ensemble de cellules dont chacune représente une unité spatiale de l'espace urbain étudié. Chaque cellule a un état qui représente l'occupation du sol de l'unité spatiale. Le nombre de différents types de l'occupation du sol est fini. Il peut s'agir par exemple de type zone verte, zone d'habitat, zone industrielle, etc. Pour construire les cartes AC

de l'occupation du sol de l'espace urbain, différents types de données géographiques peuvent être utilisées comme les images satellitaires, les données SIG, les plans urbains etc.

- **Présentation de la population par un SMA** : pour représenter la population urbaine par un Système Multi-Agent, il faut considérer la population comme un ensemble d'unités ménages. Il s'agit de l'unité la plus communément utilisée dans les enquêtes socio-économiques. Une unité ménage est composé d'un chef de ménage et des membres de famille. Pour préparer la population SMA de l'espace urbain, il y a un besoin à des données ménages provenant des enquêtes socio-économiques ou des enquêtes de recensement.
- **Description et interconnexion des processus urbains** : Le processus de mobilité résidentielle est un processus central dans le système urbain. En fait, les ménages qui constituent la population de la ville étudiée, peuvent décider chaque année de déménager d'un logement à un autre. Quand cette décision de mobilité est prise par un ménage, ce dernier décide ensuite de choisir un nouveau logement. La décision de changement de logement est faite par un algorithme qui utilise des données intrinsèques du ménage. Après la décision de mobilité, vient le processus de choix de logement qui est aussi régit par un algorithme. Ce dernier utilise des données du ménage et des données en relation avec le logement comme la qualité de logement. Ainsi chaque ménage a la possibilité de choisir parmi une sélection de logements le logement le plus approprié à ses désirs. La structure de la ville peut changer annuellement. De nouvelles zones bâties et de nouvelles zones industrielles voient le jour. Le changement de l'infrastructure induit entre deux années successives peut être introduit manuellement en utilisant des données d'infrastructure urbaine ou informatiquement en utilisant des algorithmes de prédiction de la dynamique spatiale. Les données d'infrastructure urbaine se présentent généralement sous formes de plans urbains de la ville pour un horizon de dix ans ou plus. La prédiction de la dynamique spatiale quant à elle, se fait par un algorithme qui utilise une série d'images aériennes ou satellitaires des années passées et prédit ensuite la dynamique spatiale des années futures. La croissance de la population pourrait être considérée comme un moteur de la mobilité résidentielle. La population varie en nombre pour une raison ou une autre (naissance d'un membre, décès d'un membre, emploi, mariage, départ, etc.). La croissance de la population est régit par un algorithme qui utilise des données démographiques et projette les générations suivantes sous forme de ménages.

- **Traçabilité de l'état du système** : pour que le système à modéliser garantisse la traçabilité des déplacements à l'échelle individuel des ménages durant toutes les années de la simulation, il est primordial de garder la trace des comportements résidentiels de chaque ménage notamment la décision de mobilité et de choix de logement de façon annuelle. Autrement dit, le système devrait être capable de savoir pour chaque ménage, à n'importe quelle année, s'il a changé de logement ou pas, et quel logement a-t-il choisi le cas échéant. Il est aussi primordial de garder la trace sur la croissance démographique de la population. Justement, entre deux années successives, une nouvelle génération de la population est générée. Cette nouvelle génération est le résultat d'occurrence d'événements démographiques comme la naissance de nouveau nés, le départ de jeunes de leurs familles d'origine, le mariage de jeunes, le décès de certains membres etc. Le système doit donc être capable d'archiver pour chaque année sa génération de population correspondante. Comme évoqué précédemment, le changement dans l'infrastructure de la ville peut être induit soit manuellement soit moyennant un algorithme de prédiction de dynamique spatiale. Peu importe le type, il est nécessaire de garder la traçabilité de l'occupation du sol de l'espace urbain étudié. Pour ce faire, il faut prévoir la sauvegarde de la carte de l'occupation du sol pour chaque année de simulation. En conséquence, le système sera capable de récupérer la carte de l'occupation du sol correspondante à n'importe quelle année de simulation.
- **Calcul d'indicateurs de décisions** : Le calcul d'indicateurs de décisions est un autre besoin parmi ceux qui doivent être supportés par le système à modéliser. Il s'agit par exemple du taux de mobilité, du taux de développement de zones bâties, du taux de croissance démographique, etc. Ces indicateurs peuvent se présenter aussi sous formes de graphes introduisant la dimension de temps. Par exemple, un graphe mettant en évidence l'évolution du nombre de ménages durant toutes les années de simulation. Le calcul d'indicateurs de décisions est lié directement à la notion de traçabilité du système. En fait, en supportant la traçabilité dans le système, ce dernier supporte encore plus le calcul d'indicateurs de décisions. Par exemple, réaliser un graphe d'évolution du nombres de ménages durant les années de simulation est possible tant que le système permet de récupérer la trace sur chaque année de celles de la simulation. Ainsi, en récupérant le nombre de ménages de chaque année, ledit graphe peut être facilement préparé.

5.3. Description détaillée du modèle

La modélisation proposée contient six modèles basés sur les diagrammes UML 2.0. Elle représente les parties du système à partir de différentes vues. Tous les modèles ont été conçus moyennant Entreprise architect [86]. Les quatre premiers modèles décrivent l'espace urbain, la population et leurs dynamiques. Le cinquième modèle décrit comment l'interconnexion de la mobilité résidentielle, le choix du logement, l'expansion urbaine et la croissance démographique se réalisent. Le dernier décrit la structure des principaux objets du système qui sont les objets composites responsables du suivi de ses instantanés au fil du temps.

5.3.1 Représentation de l'espace urbain

Pour représenter l'espace urbain, nous avons conçu un modèle basé sur l'automate cellulaire comme dans la Figure 32. Les éléments de base du modèle d'AC sont les cellules, les états et la grille 2D. Chaque cellule représente une unité spatiale de l'espace urbain étudié. Chaque cellule a un état qui représente l'occupation du sol. Le nombre d'états de l'AC est fini et il est déterminé en fonction de la classification de l'espace urbain étudié. Chaque cellule identifiée par une position géographique (x et y) a des voisins en fonction du type de voisinage (par exemple Van Neumann, Moore, etc.) ou le rayon du voisinage (par exemple, rayon = 400 mètres). La méthode `transitTo (State s)` décrit comment une cellule transite d'un état actuel à un autre. La classe `Grid` est une composition de la classe `Cell`. Après la génération du code, la classe `Grid` contiendra une collection `LinkedList <Cell>` pour stocker toutes les cellules représentant l'occupation du sol. La collection d'états est un ensemble d'états AC. Après la génération du code, la classe `State Collection` contiendra une collection `LinkedList <State>` pour stocker les états du système étudié.

Le modèle AC est générique et extensible. Nous pourrions créer de nouveaux modèles dérivés en fonction de la spécification de l'espace urbain nouvellement étudié en termes de nombre d'états d'AC, de règles de transition et de format de la carte de l'espace urbain, etc.

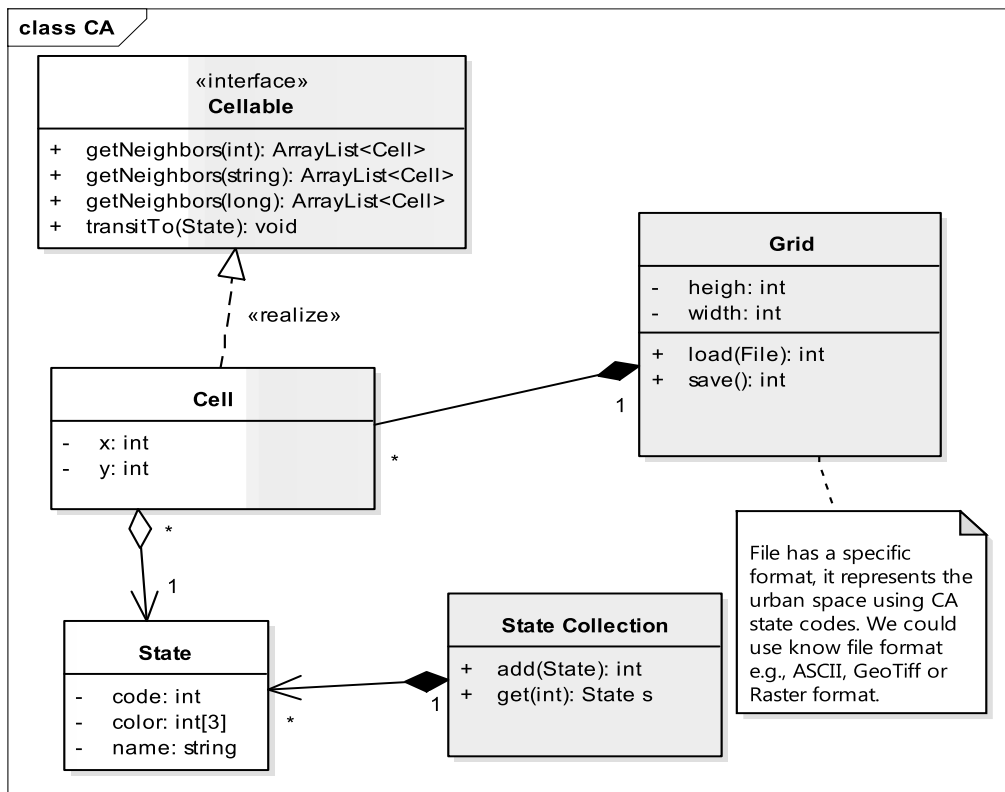


Figure 32 Modèle d'automate cellulaire

5.3.2 Représentation de la population

Pour représenter la population de l'espace urbain étudié, nous avons conçu un modèle à base d'agents comme dans la figure 2. L'élément central du modèle SMA est le ménage (HH). Ce dernier est composé d'un chef de ménage et de nombreux membres. Le ménage vit dans un logement situé dans une cellule de la grille. Le modèle MAS réutilise un Framework SMA existant (par exemple, JADE). Ainsi, le ménage étend un agent SMA d'un Framework externe. En conséquence, nous représentons chaque ménage de la population par un agent SMA et nous interconnectons chaque agent ménage avec son logement correspondant via la cellule d'AC.

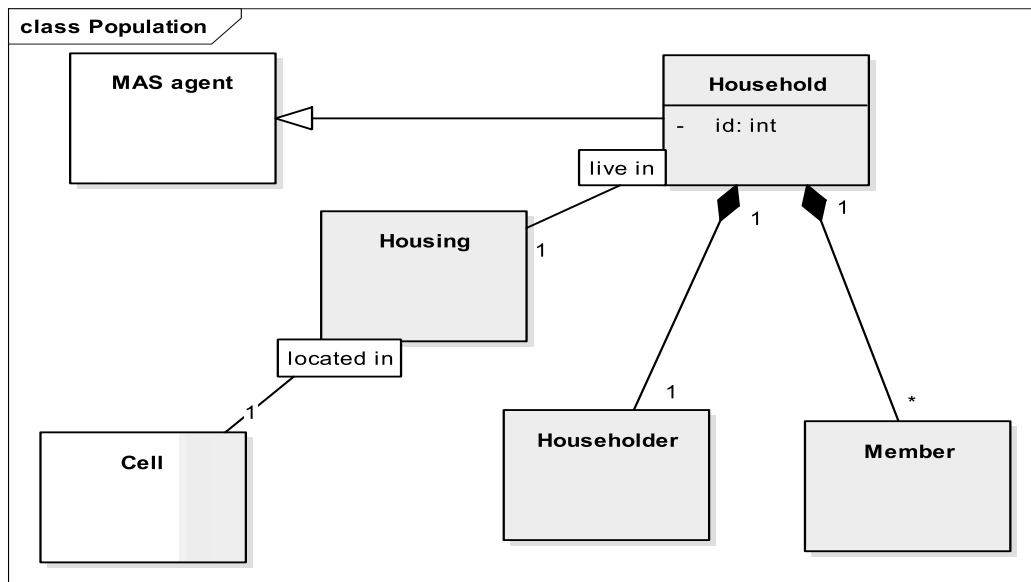


Figure 33 Modèle de SMA

5.3.3 Représentation dynamique de l'espace

Pour représenter la dynamique de l'espace urbain, nous avons proposé le modèle de la figure 4. Le modèle décrit comment suivre la dynamique de l'occupation du sol d'un espace urbain étudié au cours d'un calendrier des années. La classe LUmap étend la classe Grid. Ainsi LUmap représente l'occupation du sol de la zone urbaine étudiée à une itération donnée. LUmapCollection est un composite de plusieurs LUmap. Une carte LUmap au moment t_i changera en t_{i+1} . Afin de suivre l'évolution de l'occupation du sol pour un calendrier d'années, LUmapCollection utilisera une collection de cartes LUmap $\text{Map} \langle \text{iteration}, \text{LUmap} \rangle$ pour stocker les cartes LUmap, chacune avec son itération spécifique. Par conséquent, nous archivons la dynamique de l'occupation du sol depuis sa première année de simulation jusqu'à la dernière année. Selon les modèles, les premières cartes LUmap qui représentent l'occupation du sol de la zone urbaine étudiée pourraient être chargées à partir de fichiers avec un format spécifique ou connu, par exemple le format ASCII, GeoTIFF, Raster ou Vector. Les cartes LUmaps prochaines sont prédites à l'aide d'algorithmes et de données d'apprentissage socio-économiques et spatiales.

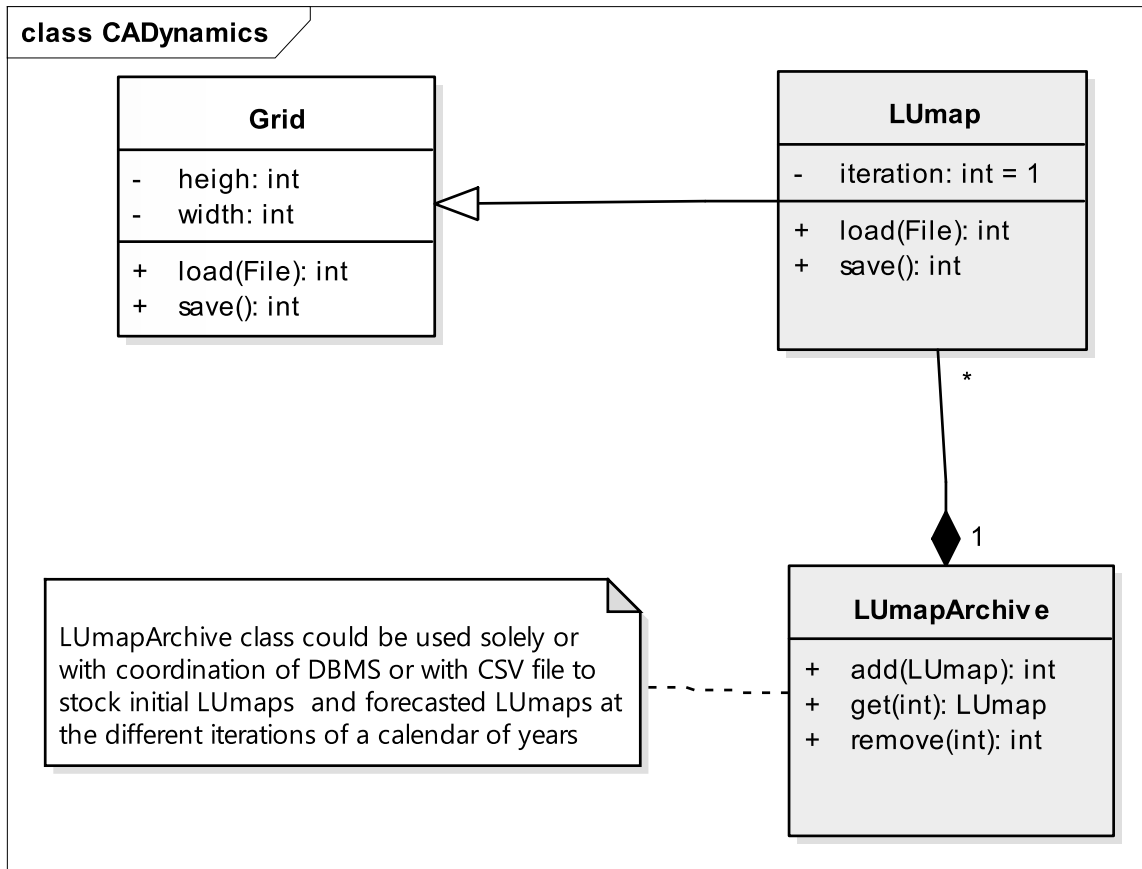


Figure 34 modèle de dynamique spatiale

5.3.4 Représentation dynamique de la population

Pour représenter la dynamique de la population, nous avons proposé le modèle suivant dans la figure 3. Il décrit comment suivre les générations de la population d'une zone urbaine étudiée au cours d'un calendrier des années afin d'établir un observatoire de la croissance démographique et aussi un observatoire des mouvements de la population. Chaque ménage est stocké avec un identifiant unique. La classe population est une composition de la classe ménage. Après la génération du code, la classe de population contiendra une collection `Map <id, Household>` pour stocker tous les ménages d'une année bien précise.

Chaque population est identifiée par une itération unique. `PopulationArchive` est une composition de la classe `Population`, ce qui signifie en d'autres termes que la classe `PopulationArchive` contient toutes les générations de la population. Après la génération du code, `PopulationArchive` contiendra une collection `Map <iteration, Population>` pour stocker chaque génération de la population avec son itération unique. Selon les modèles en littérature, la première population à l'instant t_0 provient des données issues des enquêtes ménages. Les prochaines générations de populations sont projetées à l'aide d'algorithmes de projection et de données d'apprentissage démographiques.

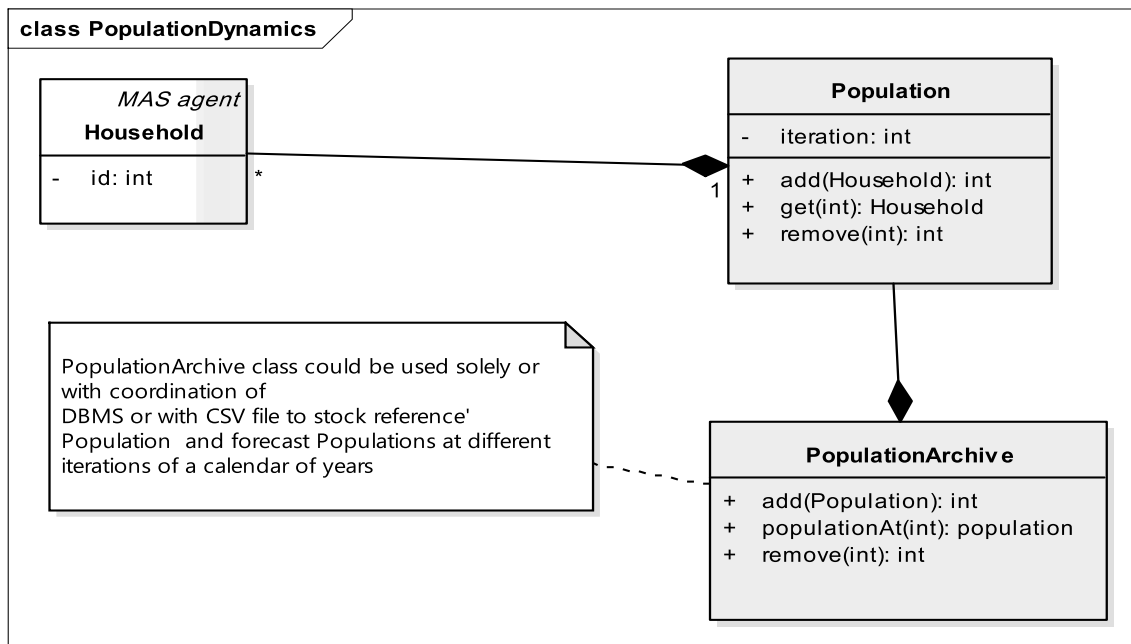


Figure 35 modèle de dynamique de la population

5.3.5 Interconnexion des processus

Le modèle encapsule quatre algorithmes. Pour modéliser leur interconnexion, nous avons proposé le modèle de la figure 5. Dans ce modèle, nous décrivons les flux d'objets et de contrôles entre les algorithmes représentés par les entités action. En supposant que les cartes LUMap à l'instant t_0 et t_1 , la population au temps t_1 , les indices de données démographiques et les données ménages sont déjà chargés dans le modèle. Le modèle itère sur un nombre d'années précédemment paramétré. Dans chaque itération, le modèle commence par le module 'LUC module' puis le module 'HH projection' pour prédire les ménages de la population au temps $t+1$. Le module 'LUC module' pourrait prédire la structure d'une carte LUMap à $t+1$ depuis les cartes LUMap à t et $t-1$ moyennant un algorithme de prédiction; Pourtant, nous pourrions paramétrer les cartes LUMaps futures manuellement dans le modèle. La région d'extension qui reste sera exécutée pour chaque ménage depuis la liste des ménages à l'instant $t+1$. L'algorithme 'Relocation' calcule pour chaque ménage la propension au changement du logement actuel. L'algorithme 'Housing choice' explore le voisinage et cherche le logement le plus approprié au ménage parmi une liste de logements dans le voisinage. Tous les agents ménages sont alimentés par ces actions résidentielles. Si un ménage décide de déménager en fonction de la propension à la mobilité, et a trouvé un logement approprié, il changera effectivement son logement, sinon il restera dans son logement actuel.

5.3.6 Structure du modèle

Pour représenter la structure des objets du système, nous avons proposé le modèle dans la figure 6, qui ne représente que les objets composites. Le modèle du système contient un seul objet LUmapArchive qui gère de nombreux objets LUmap. Chacun d'entre eux est un instantané de l'occupation du sol à une itération donnée. Chaque objet LUmap contient un nombre important d'objets Cell. De même, le modèle contient un seul objet PopulationArchive qui contient de nombreux objets Population. Chacun d'entre eux est un instantané de la population à une itération précise. Chaque objet Population contient un nombre important d'objets ménagers.

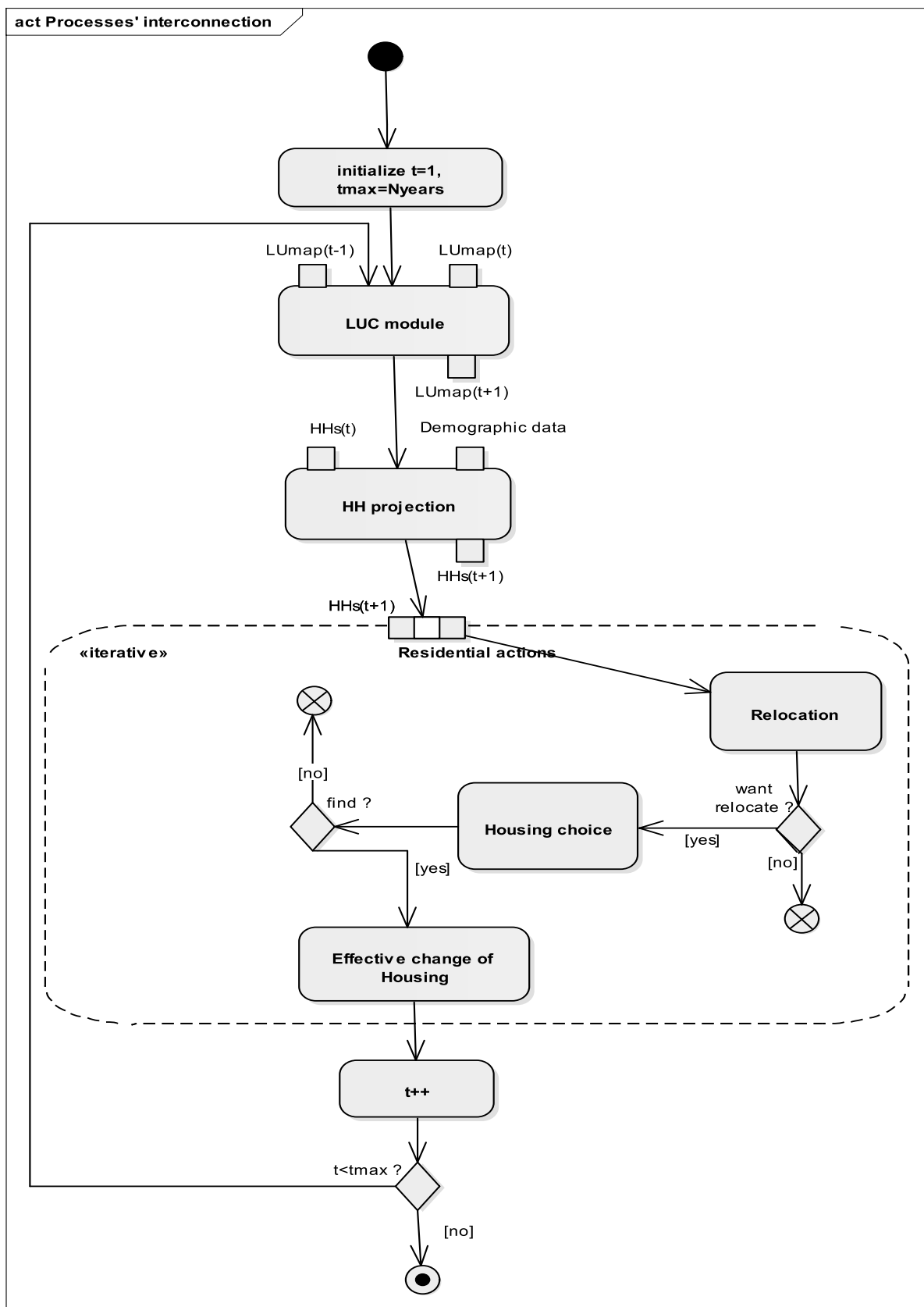


Figure 36 modèle d'interconnexion des processus

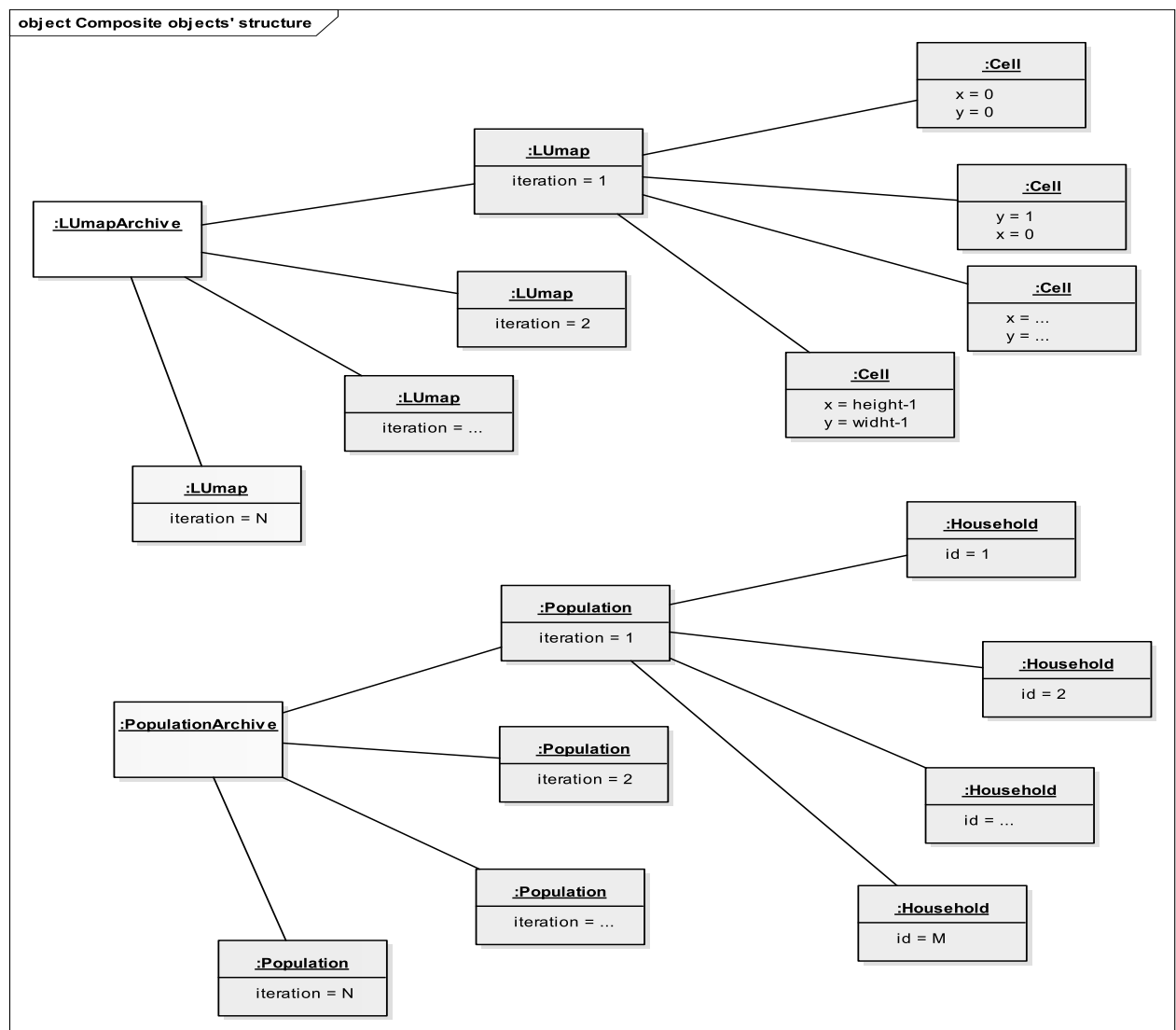


Figure 37 Structure des objets composites

5.4. Conclusion

Le modèle UML 2.0 proposé se compose de six diagrammes qui présentent les parties du système urbain depuis différentes vues. Il apporte un cadre conceptuel important et suffisant pour passer de la phase conception mathématique vers la phase développement des applications de simulation de la mobilité résidentielle à base de SMA et AC.

CHAPITRE 6. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

La progression dans notre travail

Lors de la démarche suivie nous avons dû préciser les notions importantes de décision, d'aide à la décision et de la prise de décision assistée par ordinateur. Nous nous sommes penchés aussi sur les concepts de modélisation, de simulation et de modèle notamment les modèles ascendants vu que tout problème ou système complexe ne peut être imaginé qu'à travers une représentation plus ou moins abstraite.

L'utilisation de modèles ascendants conçus suivant un paradigme orienté agent nous a alors semblé une option prometteuse pour la conception de plateformes de simulation urbaine. Après l'examen de la théorie de systèmes multi-agent, nous étions en mesure de choisir ce paradigme agent pour la conception de modèles agents représentant la dimension sociétale de la population dans les systèmes urbains.

Nous avons également pensé à l'approche Automate cellulaire pour représenter la dimension spatiale des systèmes urbains. En examinant profondément cette approche ainsi que son potentiel dans la modélisation, nous avons décidé d'utiliser cette approche pour la conception de modèles spatiaux représentant l'occupation du sol des systèmes urbains.

Ayant atteint une compréhension consistante de l'utilisation des systèmes multi-agent et automate cellulaire dans la modélisation urbaine, cela nous a bien permis de mener nos recherches détaillées sur la modélisation et la simulation de la mobilité résidentielle notre premier champ d'application.

Ces recherches ont abouti à établir une modélisation UML 2.0 conçue autour d'une approche d'alliance de SMA et AC, ayant comme objectif le support au développement de modèles informatiques de mobilité résidentielle qui se distinguent à la fois par une dimension spatiale et une gestion des acteurs urbains à savoir les ménages qui ont des actions résidentielles notamment la décision de changement de logement et de choix de logement.

Ces recherches ont abouti aussi à concrétiser notre approche théorique d'alliance de SMA et AC à travers le développement d'un simulateur et un modèle informatique intégré de la mobilité résidentielle. Le développement a eu lieu en traduisant avec le langage de programmation Java la modélisation UML 2.0 et en utilisant la plateforme Jade pour la conception de la population de l'espace urbain.

Bilan et perspectives

Notre sujet de recherche est au carrefour de plusieurs disciplines. Les champs de connaissances vastes ayant été rencontrés au cours de cette thèse nous ont souvent obligés à restreindre nos investigations pour se concentrer sur le cœur de la problématique.

Le cadre de la recherche en informatique a été dépassé dans nos travaux de recherche pour parvenir avec un vif intérêt à d'autres domaines scientifiques desquels des enseignements seront retirés et exploités dans nos futures recherches. La concrétisation de nos travaux de recherches dans l'établissement d'une approche d'alliance de SMA et AC, d'une modélisation UML 2.0, d'un simulateur et un modèle informatique de simulation de mobilité résidentielle est conforme à nos attentes.

Nous tenons poursuivre le perfectionnement des travaux entrepris dans le présent mémoire comme suit :

L'évaluation des résultats de l'expérimentation de notre simulateur et modèle informatique de simulation de la mobilité résidentielle a démontré un degré significatif de consistance avec les hypothèses théoriques du modèle. La pertinence de notre approche théorique d'alliance de SMA et AC s'est ainsi approuvée pour la modélisation et la simulation de la mobilité résidentielle. Nous envisageons dans un futur proche passer à des techniques plus avancées d'évaluation utilisant des comparaisons avec des données réelles afin de pouvoir évaluer notre système sur différentes échelles.

Un deuxième travail que nous envisageons aussi réaliser est l'extension de notre simulateur et modèle informatique que nous avons développé pour étudier la problématique de la mobilité résidentielle. Cette extension devrait porter sur l'amélioration de la modélisation fonctionnelle et conceptuelle du système réel et sur l'amélioration des fonctionnalités du simulateur.

Nous souhaitons également étendre le simulateur et la couche AC et SMA de telle sorte qu'ils deviennent plus génériques. Ce qui formera les premiers traits d'une architecture et plateforme génériques qui permettront des réutilisations ultérieures avec d'autres phénomènes urbains tels que les problèmes de feux de forêts, de gestion de trafic etc.

D'autres travaux inattendus peuvent probablement avoir lieu en fonction de partenariats et échanges avec des décideurs, experts et chercheurs dans d'autres disciplines.

LISTE DES PUBLICATIONS

Les travaux présentés dans ce manuscrit ont donné lieu aux publications suivantes :

ELALAOUY, Elarbi, RHOULAMI, Khadija and RAHMANI, Moulay Driss. "An Agent Cellular Residential Mobility Model: From Functional and Conceptual View". *INTERNATIONAL JOURNAL OF ADVANCED COMPUTER SCIENCE AND APPLICATIONS*. 2018, vol 9, no 9, p. 637–645.

ELALAOUY, Elarbi, RHOULAMI, Khadija and RAHMANI, Moulay Driss. "Cellular Automata: From Theoretical Concepts to Urban Modeling a New Methodology and Perspective". *Journal of Engineering and Applied Sciences*,. 2018, vol 13, no 12, p. 4260-4266.

ELALAOUY, Elarbi, RHOULAMI, Khadija and RAHMANI, Moulay Driss. "Towards an agent based model for simulating residential mobility and urban expansion". *Proceedings of the Mediterranean Conference on Information & Communication Technologies*. Springer International Publishing, 2016. p. 343-351.. 2015,

ELALAOUY, Elarbi, RHOULAMI, Khadija and RAHMANI, Moulay Driss. "A Novel Modeling based Agent Cellular Automata for Advanced Residential Mobility Applications". *INTERNATIONAL JOURNAL OF ADVANCED COMPUTER SCIENCE AND APPLICATIONS*. 2017, vol 8, no 7, p. 337–343.

ELALAOUY, Elarbi, RHOULAMI, Khadija and RAHMANI, Moulay Driss. *Modélisation et simulation de la mobilité résidentielle par les systèmes multi agent et automate cellulaire*. Journées doctorales dans les Technologies de l'Information et de la communication (2013)

ELALAOUY, Elarbi, RHOULAMI, Khadija and RAHMANI, Moulay Driss. *Modélisation et simulation de la mobilité résidentielle*. JS-URAC, labo LRIT, Faculté des Sciences Rabat. 2015,

ELALAOUY, Elarbi, RHOULAMI, Khadija and RAHMANI, Moulay Driss. *Modélisation pour la simulation de la ville en mouvement*. JS-URAC, labo LRIT, Faculté des Sciences Rabat. 2013,

BIBLIOGRAPHIE

- [1] «Politique de la ville», Ministère de l'Habitat et de la Politique de la Ville, http://www.mhpdv.gov.ma/?page_id=871
- [2] S. Fol, Y. Miot et C. Vignal, MOBILITÉS RÉSIDENTIELLES, TERRITOIRES ET POLITIQUES PUBLIQUES, Presses universitaires du Septentrion, 2014.
- [3] C. Maciel, P. C. De Souza, J. Viterbo, F. F. Mendes et A. E. F. Seghrouchni, «A multi-agent architecture to support ubiquitous applications in smart environments,» chez *Agent Technology for Intelligent Mobile Services and Smart Societies*, Springer, 2015, pp. 106-116.
- [4] B. Roy et D. Bouyssou, Aide multicritère à la décision: méthodes et cas, Economica Paris, 1993.
- [5] M. A. Eierman, F. Niederman et C. Adams, «DSS theory: A model of constructs and relationships,» *Decision Support Systems*, vol. 14, pp. 1-26, 1995.
- [6] A. Checroun, Comprendre, concevoir et utiliser les SIAD, Masson, 1992.
- [7] M. L. Minsky, *Matter, Mind, and Models in: ML Minsky (ed.): Semantic Information Processing*, MIT Press, 1968.
- [8] P. A. Fishwick, «Computer simulation: growth through extension,» *Transactions of the Society for Computer Simulation*, vol. 14, pp. 13-24, 1997.
- [9] C. S. Wasson, System engineering analysis, design, and development: Concepts, principles, and practices, John Wiley & Sons, 2015.
- [10] B. P. Zeigler, H. Praehofer et T. G. Kim, Theory of modeling and simulation: integrating discrete event and continuous complex dynamic systems, Academic press, 2000.
- [11] N. Bellomo, E. De Angelis et M. Delitala, «Lecture Notes on Mathematical Modelling From Applied Sciences to Complex Systems,» *SIMAI e-Lecture Notes*, vol. 8, pp. 1-169, 2010.
- [12] P. Frejd et C. Bergsten, «Mathematical modelling as a professional task,» *Educational studies in mathematics*, vol. 91, pp. 11-35, 2016.
- [13] V. I. Gertsev et V. V. Gertseva, «Classification of mathematical models in ecology,» *Ecological Modelling*, vol. 178, pp. 329-334, 2004.
- [14] N. H. Minsky, «The imposition of protocols over open distributed systems,» *IEEE Transactions on Software Engineering*, vol. 17, pp. 183-195, 2 1991.
- [15] J. Ferber, Les systèmes multi-agents vers une intelligence collective, InterEditions, 1995.
- [16] Y. Shoham, «Agent-oriented programming,» *Artificial Intelligence*, vol. 60, pp. 51-92, 1993.
- [17] M. Wooldridge, An introduction to multiagent systems, John Wiley & Sons, 2009.
- [18] R. A. Brooks, «Intelligence without representation,» *Artificial intelligence*, vol. 47, pp. 139-159, 1991.
- [19] F. L. Bellifemine, G. Caire et D. Greenwood, Developing multi-agent systems with JADE, vol. 7, John Wiley & Sons, 2007.
- [20] A. S. Rao et M. P. Georgeff, Formal models and decision procedures for multi-agent systems, Australian Artificial Intelligence Institute Melbourne, Australia, 1995.
- [21] M. Bratman, «Intention, plans, and practical reason,» 1987.
- [22] A. Drogoul, «De la simulation multi-agents à la résolution collective de problèmes,» 1993.

- [23] H. P. Nii, «Blackboard application systems, blackboard systems and a knowledge engineering perspective,» *AI magazine*, vol. 7, p. 82, 1986.
- [24] J. R. Searle, *Speech acts: An essay in the philosophy of language*, vol. 626, Cambridge university press, 1969.
- [25] Y. Labrou, T. Finin et Y. Peng, «Agent communication languages: The current landscape,» *IEEE Intelligent Systems and Their Applications*, vol. 14, pp. 45-52, 1999.
- [26] E. Elalaouy, K. Rhouлами et M. D. Rahmani, «Cellular Automata: From Theoretical Concepts to Urban Modeling a New Methodology and Perspective,» *Journal of Engineering and Applied Sciences*, vol. 13, pp. 4260-4266, 2018.
- [27] W. R. Tobler, «Cellular geography,» chez *Philosophy in geography*, Springer, 1979, pp. 379-386.
- [28] I. Uljee, G. Engelen et R. White, «RamCo Demo Guide, Workdocument CZM-C 96.08, Coastal Zone Management Centre,» *National Institute for Coastal and Marine Management, The Hague, the Netherlands*, 1996.
- [29] L. T. Gardiner, C. Turfus et M. Wang, «A hybrid N-body/cellular automaton scheme for modelling propagating star formation in galaxies,» *Publications of the Astronomical Society of Japan*, vol. 50, pp. 375-387, 1998.
- [30] B. Hayes, «Debugging the Universe,» *International Journal of Theoretical Physics*, vol. 42, pp. 277-295, 2003.
- [31] A. Ilachinski, *Cellular automata: a discrete universe*, World Scientific, 2001.
- [32] A. Lejeune, J. Perdang et J. Richert, «Application of cellular automata to N-body systems,» *Physical Review E*, vol. 60, p. 2601, 1999.
- [33] K.-S. Chen, S.-L. Wu et H.-M. Yeh, «Modeling of chemical mechanical polishing processes by cellular automata and finite element/matlab integration methods,» *Microsystem Technologies*, vol. 21, pp. 1879-1892, 2015.
- [34] V. Lupiano, G. Machado, G. M. Crisci et S. Di Gregorio, «Modelling Fast-moving Flow-like Landslides by Cellular Automata: Simulations of Debris Flows and Lahars,» chez *Advances in Environmental and Geological Science and Engineering, proceeding of WSEAS 8th International Conference (EG'15), Salerno, Italy*, 2015.
- [35] M. Mareschal et B. L. Holian, *Microscopic simulations of complex hydrodynamic phenomena*, vol. 292, Springer Science & Business Media, 2013.
- [36] Y. Medvedev, «A Multiparticle Lattice-Gas Cellular Automaton Simulating a Piston Motion,» chez *Designing Beauty: The Art of Cellular Automata*, Springer, 2016, pp. 117-118.
- [37] M. S. Alber, Y. Jiang et M. A. Kiskowski, «Lattice gas cellular automation model for rippling and aggregation in myxobacteria,» *Physica D: Nonlinear Phenomena*, vol. 191, pp. 343-358, 2004.
- [38] A. Stevens, «A stochastic cellular automaton modeling gliding and aggregation of myxobacteria,» *SIAM Journal on Applied Mathematics*, vol. 61, pp. 172-182, 2000.
- [39] A. B. Holmes, S. Kalvala et D. E. Whitworth, «Spatial simulations of myxobacterial development,» *PLoS Comput Biol*, vol. 6, p. e1000686, 2010.
- [40] K. Preston Jr et M. J. B. Duff, *Modern cellular automata: theory and applications*, Springer Science & Business Media, 2013.
- [41] P. L. Rosin, «Image processing using 3-state cellular automata,» *Computer vision and image understanding*, vol. 114, pp. 790-802, 2010.
- [42] K. J. J. Kumar, S. J. Gladwin, V. Karthick et V. Vaithianathan, «Realization of AES with Cellular automata Based S-Box For High-Speed Image Encryption,» *Asian Journal of Information Technology*, vol. 15, pp. 1243-1248, 2016.

- [43] Y. Wang, W. Zhou et X. Wang, «Cellular Neural Networks for Object Segmentation of Image Sequence,» *Asian Journal of Information Technology*, vol. 4, pp. 1098-1101, 2005.
- [44] R. White et G. Engelen, «Cellular automata and fractal urban form: a cellular modelling approach to the evolution of urban land-use patterns,» *Environment and planning A*, vol. 25, pp. 1175-1199, 1993.
- [45] P. Waddell et G. F. Ulfarsson, «Introduction to urban simulation: Design and development of operational models,» *Handbook in transport*, vol. 5, pp. 203-236, 2004.
- [46] Dagmar Haase et R. Seppelt, «Modeling and simulating residential mobility in a shrinking city using an agent-based approach,» *Environmental Modelling & Software*, vol. 25, pp. 1225-1240, 2010.
- [47] H. S. Moghadam et M. Helbich, «Spatiotemporal urbanization processes in the megacity of Mumbai, India: A Markov chains-cellular automata urban growth model,» *Applied Geography*, vol. 40, pp. 140-149, 2013.
- [48] E. Dubos-Paillard, Y. Guermond et P. Langlois, «Analyse de l'évolution urbaine par automate cellulaire. Le modèle SpaCelle,» *L'espace géographique*, vol. 32, pp. 357-378, 2003.
- [49] L. H. Encinas, S. H. White, A. M. Rey et G. R. Sanchez, «Modelling forest fire spread using hexagonal cellular automata,» *Applied mathematical modelling*, vol. 31, pp. 1213-1227, 2007.
- [50] I. Agbossou, D. Provitolo et P. Frankhauser, «Expérimentation par voie informatique de la mobilité résidentielle,» chez *XV^e Journées de Rochebrune-Rencontres interdisciplinaires sur les systèmes complexes naturels et artificiels*, 2008.
- [51] F. Wu, «A linguistic cellular automata simulation approach for sustainable land development in a fast growing region,» *Computers, Environment and Urban Systems*, vol. 20, pp. 367-387, 1996.
- [52] R. Jordan, M. Birkin et A. Evans, «Agent-based modelling of residential mobility, housing choice and regeneration,» chez *Agent-based models of geographical systems*, Springer, 2012, pp. 511-524.
- [53] M. Batty, P. Longley et S. Fotheringham, «Urban growth and form: scaling, fractal geometry, and diffusion-limited aggregation,» *Environment and Planning A*, vol. 21, pp. 1447-1472, 1989.
- [54] D. McFadden et others, «Conditional logit analysis of qualitative choice behavior,» 1973.
- [55] E. El-alaouy, K. Rhouлами et M. D. Rahmani, «Towards an agent based model for simulating residential mobility and urban expansion,» *Proceedings of the Mediterranean Conference on Information & Communication Technologies. Springer International Publishing, 2016. p. 343-351.*, 2015.
- [56] Y. Du, W. Wen, F. Cao et M. Ji, «A case-based reasoning approach for land use change prediction,» *Expert Systems with Applications*, vol. 37, pp. 5745-5750, 2010.
- [57] L. Wissen et A. Rima, *Modelling urban housing market dynamics: evolutionary patterns of households and housing in Amsterdam*, vol. 18, Elsevier Science Ltd, 1988.
- [58] R. Hegselmann et A. Flache, «Understanding complex social dynamics: A plea for cellular automata based modelling,» *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, vol. 1, p. 1, 1998.
- [59] E. Dubos-Paillard, Y. Guermond et P. Langlois, «Analyse de l'évolution urbaine par automate cellulaire. Le modèle SpaCelle,» *L'espace géographique*, vol. 32, pp. 357-378, 2003.

- [60] H. S. Moghadam et M. Helbich, «Spatiotemporal urbanization processes in the megacity of Mumbai, India: A Markov chains-cellular automata urban growth model,» *Applied Geography*, vol. 40, pp. 140-149, 2013.
- [61] J. P. Antoni, V. Judge, G. Vuidel et O. Klein, «Constraint Cellular Automata for Urban Development Simulation: An Application to the Strasbourg-Kehl Cross-Border Area,» chez *Geomatic Approaches for Modeling Land Change Scenarios*, M. T. Camacho Olmedo, M. Paegelow, J. Mas et F. Escobar, Édts., Cham, : Springer International Publishing, 2018, pp. 293-306.
- [62] J. Ji, L. Lu, Z. Jin, S. Wei et L. Ni, «A cellular automata model for high-density crowd evacuation using triangle grids,» *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2018.
- [63] B. K. Pandey et D. Khare, «Analyzing and modeling of a large river basin dynamics applying integrated cellular automata and Markov model,» *Environmental Earth Sciences*, vol. 76, p. 779, 2017.
- [64] Z. Zheng, W. Huang, S. Li et Y. Zeng, «Forest fire spread simulating model using cellular automaton with extreme learning machine,» *Ecological Modelling*, vol. 348, pp. 33-43, 2017.
- [65] I. Benenson, «Agent-based modeling: From individual residential choice to urban residential dynamics,» *Spatially integrated social science: Examples in best practice*, vol. 42, pp. 67-95, 2004.
- [66] V. Dabbaghian, P. Jackson, V. Spicer et K. Wuschke, «A cellular automata model on residential migration in response to neighborhood social dynamics,» *Mathematical and Computer Modelling*, vol. 52, pp. 1752-1762, 2010.
- [67] S. Lauf, D. Haase et B. Kleinschmit, «Land-use scenario modelling based on human decisions--Combining system dynamics and cellular automata,» 2012.
- [68] V. Kocabas et S. Dragicevic, «Bayesian networks and agent-based modeling approach for urban land-use and population density change: a BNAS model,» *Journal of geographical systems*, vol. 15, pp. 403-426, 2013.
- [69] J. Barth{\e}lmy et T. Carletti, «An adaptive agent-based approach to traffic simulation,» *Transportation research procedia*, vol. 25, pp. 1238-1248, 2017.
- [70] M. Durak, N. Durak, E. D. Goodman et R. Till, «Optimizing an agent-based traffic evacuation model using genetic algorithms,» chez *Winter Simulation Conference (WSC), 2015*, 2015.
- [71] H. Wang et C.-J. Chang, «Simulation of Housing Market Dynamics: Amenity Distribution and Housing Vacancy,» chez *Proceedings of the 2013 Winter Simulation Conference: Simulation: Making Decisions in a Complex World*, Piscataway, 2013.
- [72] P. M. Torrens, «Cellular automata and multi-agent systems as planning support tools,» chez *Planning support systems in practice*, Springer, 2003, pp. 205-222.
- [73] V. Gaube, A. Remesch et B. Smetschka, «Planning, Residential Decisions and Energy Use in Vienna,» chez *Social Ecology*, Springer, 2016, pp. 489-503.
- [74] C. Ma, G. Y. Zhang, X. C. Zhang, Y. J. Zhao et H. Y. Li, «Application of Markov model in wetland change dynamics in Tianjin Coastal Area, China,» *Procedia Environ. Sci.*, vol. 13, pp. 252-262, 2012.
- [75] H. Araya Yikalo et C. Pedro, «Analysis and Modeling of Urban Land Cover Change in Setubal and Sesimba, Portugal,» *Remote Sensing*, vol. 2, pp. 1549-1563, 2010.
- [76] M. Al-Ageili, M. Mouhoub et J. Piwowar, «Remote Sensing, Gis and Cellular Automata for Urban Growth Simulation,» *Computer and Information Science*, vol. 10, p. 38, 2017.

- [77] E. Elalaouy, K. Rhoulami et M. D. Rahmani, «An Agent Cellular Residential Mobility Model: From Functional and Conceptual View,» *INTERNATIONAL JOURNAL OF ADVANCED COMPUTER SCIENCE AND APPLICATIONS*, vol. 9, pp. 637-645, 2018.
- [78] C. Nikolai et G. Madey, «Tools of the trade: A survey of various agent based modeling platforms,» *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, vol. 12, p. 2, 2009.
- [79] S. Abar, G. K. Theodoropoulos, P. Lemarinier et G. M. P. O'Hare, «Agent Based Modelling and Simulation tools: A review of the state-of-art software,» *Computer Science Review*, 2017.
- [80] P. Caillou, «DÉVELOPPEMENT DE SMA,» p. 27.
- [81] E. Elalaouy, K. Rhoulami et M. D. Rahmani, «A Novel Modeling based Agent Cellular Automata for Advanced Residential Mobility Applications,» *INTERNATIONAL JOURNAL OF ADVANCED COMPUTER SCIENCE AND APPLICATIONS*, vol. 8, pp. 337-343, 2017.
- [82] V. Gaube et A. Remesch, «Impact of urban planning on household's residential decisions: An agent-based simulation model for Vienna,» *Environmental modelling & software*, vol. 45, pp. 92-103, 2013.
- [83] J.-P. Antoni et G. Vuidel, *MobiSim: un modèle multi-agents et multi-scalaire pour simuler les mobilités urbaines*, Economica, Méthodes et approches, 2010.
- [84] S. Luke, C. Cioffi-Revilla, L. Panait, K. Sullivan et G. Balan, «Mason: A multiagent simulation environment,» *Simulation*, vol. 81, pp. 517-527, 2005.
- [85] R. M. Itami, «Simulating spatial dynamics: cellular automata theory,» *Landscape and urban planning*, vol. 30, pp. 27-47, 1994.
- [86] Sparx, «Entreprise architect».
- [87] E. Elalaouy, K. Rhoulami et M. D. Rahmani, «Modélisation et simulation de la mobilité résidentielle,» chez *Journée URAC'15*, 2015.
- [88] E. Elalaouy et K. Rhoulami, «Survey Management Web Platform Applied Morocco Household Survey Panel,» *International Journal of Computer Science Issues (IJCSI)*, vol. 11, p. 84, 2014.
- [89] E. Elalaouy, K. Rhoulami et M. D. Rahmani, «Modélisation pour la simulation de la ville en mouvement,» *Journée URAC'13*, 2013.
- [90] E. Elalaouy, K. Rhoulami et M. D. Rahmani, «Modélisation et simulation de la mobilité résidentielle par les systèmes multi agent et automate cellulaire,» *JDTIC'13*, 2013.

Résumé :

Un objectif de moyen terme auquel réfléchit notre équipe de recherche est le développement d'une plateforme d'aide à la décision de simulation de systèmes urbains. Cette plateforme doit prendre en compte simultanément la dimension spatiale et les actions résidentielles des acteurs urbains.

Encadré par cette ambition, nous nous intéressons dans ce travail de thèse, à l'étude des approches systèmes multi-agent (SMA) et automates cellulaire(AC), leurs principes et leur appropriation avec la modélisation et la simulation des systèmes urbains. Nous nous concentrons ensuite sur la modélisation et la simulation de la mobilité résidentielle, le champ d'application de notre approche d'alliance de SMA et AC. Nous élaborons une modélisation UML 2.0 centrée sur notre approche d'alliance de SMA et AC. Nous élaborons également notre modèle informatique de simulation de la mobilité résidentielle prenant en compte la dimension spatiale et les comportements individuels des ménages composant la population de l'espace urbain étudié.

Pour concrétiser notre approche théorique, nous implémentons notre modèle et simulateur de mobilité résidentielle moyennant le langage Java et la plateforme Jade de SMA. Nous effectuons finalement une expérimentation de validation du modèle pour évaluer son fonctionnement.

Mots-clefs : modélisation et simulation ; simulation urbaine ; mobilité résidentielle ; automate cellulaire ; systèmes multi-agents.

Abstract :

A medium-term goal of our research team is the development of a decision support platform for urban systems simulation. This platform must simultaneously take into account the spatial dimension and the residential actions of urban actors.

Framed by this ambition, we are interested in this thesis work, firstly to the study of multi-agent systems (SMA) and cellular automata (CA) approaches, their principles and their appropriation with the modeling and simulation of urban systems. We then focus on the modeling and simulation of residential mobility, the first field of application of alliance approach of multi-agent systems and cellular automaton. We design a UML 2.0 modeling centered on our alliance approach of SMA and AC. We also develop our residential mobility simulation computer model taking into account the spatial dimension and the individual behaviors of the households making up the population of the studied urban space.

To realize our theoretical approach, we implement our residential mobility model and simulator using the Java language and the Jade platform. We finally perform an experiment of model's validation to evaluate the model's functioning.

Keywords: computer model; urban simulation; residential mobility; cellular automaton; multi-agent systems