

# Conception et évaluation d'un prototype de simulation de la morphogenèse urbaine par agents vecteurs multi-échelles

THÈSE N° 4761 (2010)

PRÉSENTÉE LE 14 OCTOBRE 2010

À LA FACULTÉ ENVIRONNEMENT NATUREL, ARCHITECTURAL ET CONSTRUIT  
LABORATOIRE DE SYSTÈMES D'INFORMATION GÉOGRAPHIQUE  
PROGRAMME DOCTORAL EN ENVIRONNEMENT

ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE

POUR L'OBTENTION DU GRADE DE DOCTEUR ÈS SCIENCES

PAR

Vitor SILVA

acceptée sur proposition du jury:

Prof. A. Martinoli, président du jury  
Prof. F. Golay, Prof. P. Berger, directeurs de thèse  
Prof. R. Billen, rapporteur  
Dr A. Ruas, rapporteur  
Prof. M. Schuler, rapporteur



ÉCOLE POLYTECHNIQUE  
FÉDÉRALE DE LAUSANNE

Suisse  
2010



## Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier tous les membres de mon jury de thèse, notamment le directeur du jury le Prof. Alcherio Martinoli, mon directeur de thèse le Prof. François Golay, mon co-directeur de thèse le Prof. Patrick Berger, le Prof. Roland Billen, le Prof. Martin Schuler et le Dr Anne Ruas pour avoir accepté de participer à mon examen oral et pour leur effort de lecture de mon rapport de thèse.

Je remercie respectueusement le Prof. Patrick Berger, professeur d'architecture de réputation internationale et co-directeur de cette thèse, de m'avoir accepté au sein de son laboratoire et permis de réaliser ce travail de recherche. Il m'a conseillé avec autorité et perspicacité.

Je remercie infiniment le Dr Corinne Plazanet pour l'encadrement de cette thèse. Je la remercie en outre pour son contact humain et pour m'avoir appris une large palette de compétences dans le domaine des systèmes d'information géographique.

Je remercie chaleureusement le Prof. François Golay pour son soutien, tant scientifique qu'humain, tout au long de ce travail et jusqu'à sa conclusion. Je le remercie également pour sa rigueur et son effort fourni lors de la relecture de mon document.

Je remercie amicalement le Dr Jong-Jin Park pour sa participation à mon travail de thèse ainsi que pour sa sensibilité et à son ouverture au domaine de la recherche urbaine. Notre échange constant m'a permis d'élaborer avec rigueur la conception du prototype de simulation.

Je remercie avec sympathie Claudio Carneiro pour ses conseils avisés, sa disponibilité et sa bonne humeur. Je le remercie également pour son effort fourni lors de la rédaction de nos publications. Notre échange m'a été très profitable, notamment dans le domaine de la 3D urbaine.

Je remercie les collaborateurs du laboratoire UTA Philippe Bonhôte et le Dr Bassel Farra pour leur participation à ce travail de recherche et leur grande expérience dans le domaine de l'architecture.

Je remercie chaleureusement le Prof. Roland Billen de l'Université de Liège en Belgique de m'avoir permis de finir ma thèse en toute sérénité. Je le remercie de m'avoir fourni un cadre où j'ai pu valoriser les résultats scientifiques de ma recherche.

Je remercie Eric Grosso du laboratoire COGIT pour sa disponibilité et ses conseils en matière de débogage.



# **Conception et évaluation d'un prototype de simulation de la morphogenèse urbaine par agents vecteurs multi-échelles**

## ***Résumé***

Le travail de recherche de cette thèse de doctorat a été réalisé dans le cadre d'un projet interdisciplinaire relatif à l'étude de la morphogenèse urbaine. Une équipe composée d'architectes et d'ingénieurs spécialisés dans les technologies SIG ont travaillé ensemble sur ce projet durant trois ans, partageant leurs connaissances afin de comprendre et simuler l'évolution de l'environnement urbain des villes.

L'hypothèse fondamentale qui a conduit cette recherche est que la ville peut être vue comme un système auto-organisé régi par un ensemble de règles de morphogenèse qui peuvent, par exemple, déterminer la localisation de nouveaux programmes architecturaux et influencer l'organisation de la ville, de l'échelle locale à l'échelle globale. Les programmes architecturaux eux-mêmes sont supposés déterminer le développement de la ville.

Dans cette thèse de doctorat on a conçu un prototype de simulation de la croissance urbaine basé sur les systèmes multi-agents. Ce prototype est un outil informatique qui permet l'analyse et la représentation de la croissance du milieu bâti. De nos jours, la capacité à comprendre et à simuler l'évolution urbaine s'avère essentielle afin de contrôler l'évolution de la ville selon une perspective durable. En outre, cet outil pourrait faciliter la compréhension et les prises de décision de ceux concernés par les problèmes liés au développement urbain.

Le système urbain a été modélisé comme un ensemble d'objets spatiaux, tels des bâtiments et des réseaux qui interagissent. Ces interactions se déroulent à plusieurs niveaux, de l'échelle locale à l'échelle globale, et sont contrôlées par des règles de comportement ou des règles de croissance. Le résultat de leur interaction peut être des figures ou des phénomènes émergents à différentes échelles.

L'approche utilisant les systèmes multi-agents vecteurs a été choisie afin de modéliser un système géographique complexe telle une ville, qui intègre une modélisation vectorielle de l'espace. Par conséquent, chaque agent spatial n'a pas de limite de forme et de taille. L'intérêt d'utiliser les systèmes multi-agents vecteurs réside aussi dans leur capacité à gérer plusieurs modèles d'individus, de simples entités à des entités plus complexes.

La plateforme de développement utilisée est GeOxylene (langage de programmation Java), qui est une plateforme de développement open-source développée à l'IGN (Institut Géographique National, France), par le laboratoire COGIT. Cette plateforme fournit plusieurs fonctions SIG, permettant le développement et l'implémentation du prototype présenté.

Un modèle d'interaction entre les agents a été défini et le type de scénarios de chacune de ces interactions a été détaillé. Un ensemble de méthodes et des classes a été développé. L'architecture des agents a été conçue afin de permettre la manipulation (envoi, réception et traitement) des messages échangés.

Afin de montrer la pertinence de la méthode par systèmes multi-agents multi-échelles, on a réalisé des exemples de création de bâtiments dans une zone d'étude.

En utilisant le prototype de simulation par agents vecteurs multi-échelles présenté ici, le développement des villes peut être simulé d'une façon très innovante.

Toutefois, le prototype utilisé manque encore de précision, principalement du au fait que les lois spécifiées adoptées pour la simulation ne reflètent pas complètement la réalité, qui est évidemment beaucoup plus complexe à traduire. Nous n'avons pas encore validé le modèle dans d'autres villes – néanmoins le modèle pourrait être utilisé comme un outil d'aide à la décision, particulièrement comme un instrument d'aide à la planification pour les architectes et les urbanistes.

En ce qui concerne des travaux futurs ce prototype devrait être intégré dans une approche globale de simulation urbaine, permettant l'analyse de risques environnementaux, de la croissance démographique et économique et la simulation de transports à différentes échelles d'analyse et de visualisation 2D/3D, comme les quartiers et la ville.

**Mots-clés:** Systèmes multi-agents; Agents Vecteurs; Simulation urbaine ; Modélisation multi-échelle ; Morphogenèse ; Systèmes d'information géographique ; Villes ; Planification urbaine

## **Design and evaluation of a simulation prototype of urban morphogenesis by multi-scales vectors agents**

### ***Abstract***

The research work of this PhD thesis was carried out in the context of an interdisciplinary project related to the study of urban morphogenesis. A team composed of architects and engineers specialized in GIS technologies have worked together in this project during three years, sharing their knowledge in order to understand and simulate the evolution of the urban environment of cities.

The fundamental hypothesis that conducted this research is that the city can be seen as a self-organizing system governed by a set of morphogenesis rules, which can for example, determine the location of new architectural programs and induce the city's organization, from local to global scales. Architectural programs themselves are supposed to determine city's development.

In this PhD thesis a simulation prototype of the urban growth based on the use of multi-agents systems was carried out. This prototype is a computer tool that allows the analysis and representation of the growth of the built environment. Nowadays, the ability to understand and simulate urban evolution proves to be essential in order to control the evolution of a city in a sustainable development view. Furthermore, this tool should facilitate the understanding and decision-making of those concerned with problems related to urban development.

The urban system has been modeled as a set of space objects, such as buildings and networks, which interact between themselves. These interactions are carried out at different levels, from local to global scales, being controlled by behavioral rules or laws of growth. The result of their interaction can be figures or emergent phenomena represented at several scales.

The approach using multi-agents vector systems was chosen in order to model a geographical complex system like a city, which integrates a vectorial modeling of space. Hence, each spatial agent does not possess a limit of form and size. The interest of using multi-agents vector systems also lies in their ability to manage various models of individuals, from simple entities to more complex ones. Thus, various levels of representation, such as individuals and groups of individuals, can be managed, which is not easily feasible, for example, with cellular agents.

The development platform used is GeOxygene (Java computer programming language), which is an open-source platform developed at IGN (Institut Géographique National, France), by COGIT laboratory. This platform provides several GIS functions, allowing the development and implementation of the prototype here presented.

An interaction model between agents was defined and the type of scenarios of each of these interactions was detailed. A set of methods and associated classes was developed. Agent's architecture was conceived in order to allow manipulation (sending, receiving and treatment) of exchanged messages.

In order to show the relevance of the multi-agent multi-scale methodology, examples of buildings creation in a case study zone were carried out.

Using the multi-scale vector simulation prototype here presented, the development of cities can be computed in a very innovative way. However, the developed prototype still lacks some accuracy, mostly due to the fact that the specified laws adopted for simulation do not reflect the whole reality, which is obviously much more complex to traduce. We have not yet validated the model for other cities - nevertheless, the model could already be used as a decision support tool, particularly as a planning support instrument for architects and urban planners.

With regards to future work this prototype shall be integrated in a global approach of urban simulation, allowing the analysis of environmental risks, demographic and economic growth and transports simulation at different scales of analysis and 2D/3D visualization output, such as district and city.

**Keywords:** Multi-agents systems; Vector Agent; Urban simulation; Multi-scale modeling; Morphogenesis; Geographic information systems; Cities; Urban Planning



## Sommaire

CHAPITRE 1 : INTRODUCTION .....	15
1.1 La ville en question .....	15
1.1.1 L'intérêt porté à la gestion urbaine .....	15
1.1.2 L'urbanisation : un phénomène d'actualité et d'envergure mondiale .....	16
1.2 Contexte général de la thèse .....	17
1.2.1 Le développement durable des villes .....	17
1.2.2 La simulation urbaine .....	18
1.2.3 Nouvelles approches en planification urbaine .....	19
1.3 Le projet interdisciplinaire de recherche sur la métropole .....	20
1.3.1 Présentation du projet .....	20
1.3.1 Zone d'étude .....	22
1.3.2 Equipe ayant participé au projet .....	23
1.3.3 Collaborations .....	24
1.4 Définition de la question de recherche .....	24
1.5 Méthodologie employée pour répondre à la question de recherche .....	25
1.6 Hypothèses et postulats de recherche .....	27
1.6.1 Définitions .....	27
a) Métropole .....	27
b) Morphogenèse .....	28
c) Programme architectural .....	28
1.6.2 Postulats .....	28
1.7 Plan du document .....	30
CHAPITRE 2 : LOIS DE MORPHOGENESE ET FORMES D'ORGANISATION DANS LA VILLE .....	31
2.1 Lois de morphogenèse .....	31
2.1.1 La croissance .....	32
2.1.2 La création de services .....	33
2.1.3 La stabilité du système (espérance de vie) .....	34
2.1.4 Evènements liés à des prises de décision .....	34
2.1.5 Autres évènements .....	34
2.1.6 Adéquation aux parcelles et à la zone d'affectation .....	34
2.1.7 La fonction d'organisation dynamique du programme architectural .....	35

2.2	Formes d'organisation dans la ville .....	35
2.2.1	Groupe d'Habitats [Park, 2009] : .....	35
2.2.2	Les systèmes urbains [Park, 2009] .....	39
CHAPITRE 3 : ETAT DE L'ART .....		41
3.1	Les systèmes d'information géographique .....	41
3.2	Etat de la recherche concernant la modélisation de la ville .....	41
3.3	La simulation urbaine .....	42
3.3.1	Simulation ludique du développement urbain.....	43
3.3.2	Simulation de la dynamique urbaine selon des thématiques sociales particulières .....	43
3.3.3	Simulation de l'expansion urbaine .....	43
3.4	Environnements de simulation urbaine .....	43
3.4.1	Gigapolis .....	44
3.4.2	OBEUS.....	44
3.4.3	UrbanSim .....	45
3.4.4	UrbanLab .....	45
3.4.5	Projet aux Pays-Bas .....	46
3.5	Approche systémique.....	46
3.6	Les systèmes complexes.....	47
3.7	Les systèmes multi-agents.....	48
3.7.1	Intelligence artificielle .....	48
3.7.2	Intelligence artificielle distribuée .....	48
3.7.3	Définition d'un agent.....	48
3.7.4	Architecture interne d'un agent.....	49
a)	Architecture cognitive .....	50
b)	Architecture réactive .....	50
3.7.5	Définition d'un SMA .....	51
3.7.6	Applications des SMA .....	53
3.7.7	Plateformes de simulation multi-agents .....	54
3.8	Approches de modélisation et de simulation urbaine .....	55
3.8.1	Automates cellulaires .....	55
3.8.2	Agents cellulaires.....	56
3.8.3	Agents vecteur.....	57

3.10	Synthèse .....	58
CHAPITRE 4 : MODELISATION MULTI-AGENTS DU SYSTEME URBAIN .....		61
4.1	La simulation informatique .....	61
4.1.1	Définition .....	61
4.1.2	Avantages et inconvénients .....	62
4.2	Modélisation du système urbain .....	62
4.2.1	Définition d'un modèle .....	62
4.2.2	Le système à modéliser .....	62
4.2.3	Modélisation .....	63
4.2.4	Modélisation multi-échelle du système urbain .....	63
a)	Niveau Micro .....	65
b)	Niveau méso .....	65
c)	Niveau macro .....	65
4.3	Le Degré de Satisfaction .....	66
4.3.1	Définition et calcul du Degré de Satisfaction .....	66
a)	Influence positive .....	72
b)	Influence négative .....	72
4.3.2	Prise en compte d'autres paramètres pertinents dans le calcul du DS .....	72
a)	Méthode de calcul de la visibilité à partir du LIDAR .....	72
b)	Intégration des paramètres d'exposition solaire dans le calcul du DS .....	74
c)	Formule finale du Degré de Satisfaction .....	75
4.4	Algorithme de localisation des bâtiments .....	75
4.4.1	Recherche des points de localisation potentielle de meilleure satisfaction .....	75
a)	Etape 1 : Echantillonnage .....	76
b)	Etape 2 : Intersection .....	76
c)	Etape 3 : Calcul du <i>Degré de Satisfaction</i> pour chaque point .....	77
4.4.2	Forme géométrique et orientation des bâtiments à créer .....	77
4.5	Synthèse .....	79
CHAPITRE 5 : CONCEPTION ET IMPLEMENTATION DU PROTOTYPE .....		81
5.1	La plateforme de développement utilisée .....	81
5.1.2	GeOxygene .....	81
5.2	Modèle du système à implémenter .....	83

5.3	Les quatre composantes du modèle de simulation multi-agents .....	84
5.3.1	Modélisation de l'environnement.....	85
5.3.2	Modélisation des agents .....	85
a)	Méthodes des agents .....	86
b)	Les agents dans le système urbain .....	86
c)	Groupes de bâtiments dans la métropole.....	87
5.3.3	Modélisation des interactions.....	88
a)	Les performatifs.....	89
b)	Scénarios standard .....	90
c)	Principes de négociation entre agents.....	91
d)	Modèle d'interaction.....	91
e)	Méthodes des agents associées aux interactions .....	93
f)	Exemple d'interaction simple .....	93
5.3.4	Modélisation de l'organisation.....	95
a)	La gestion du temps dans le système .....	95
b)	Simulation à pas de temps constant .....	95
c)	Simulation par évènements .....	96
d)	Choix de simulation : par évènements et à pas de temps constant .....	97
5.4	Algorithmes de détection de groupes urbains .....	97
a)	Indicateurs morphologiques des bâtiments.....	97
b)	Détection des groupes de logements en utilisant une base de données avec des algorithmes géomatiques.....	99
CHAPITRE 6 : .....		103
SIMULATIONS ET VALIDATION .....		103
6.1	Introduction.....	103
6.2	Validation des résultats de simulation à l'échelle micro.....	104
6.2.1	Simulations par agents vecteurs multi-échelles.....	104
a)	Scénario 1 : création d'une école secondaire dans une commune suite à la demande d'un groupe de logements .....	104
b)	Scénario 2 : Création d'un groupe de logements pour étudiants suite à une augmentation du flux entrant d'étudiants dans la commune .....	114
6.3	Validation des résultats à l'échelle méso .....	119

6.3.1	Représentation et détection de groupes urbains .....	120
a)	Etude de cas 1.....	120
b)	Etude de cas 2.....	125
6.3.2	Simulation de la croissance urbaine.....	131
6.4	Vérification de l’extensibilité du prototype : étude de cas pour le paramètre <i>visibilité</i> .....	134
6.5	Approche de validation future du prototype .....	138
6.5.1	Approche de validation quantitative.....	138
6.5.2	Validation du prototype par les utilisateurs.....	139
6.6	Le prototype développé peut-il servir à vérifier l’impact d’un programme architectural sur la dynamique urbaine ?.....	140
6.6.1	Premier exemple de simulation .....	140
a)	Scénario impact de programme : avec programme.....	140
c)	Scénario impact de programme : sans programme.....	141
a)	Scénario impact de programme : avec programme.....	142
b)	Scénario impact de programme : sans programme.....	143
6.7	Discussion du modèle multi-agents .....	144
6.8	Le système développé est-il pertinent ? .....	145
CHAPITRE 7 : .....		147
CONCLUSION ET PERSPECTIVES .....		147
7.1	Synthèse .....	147
7.2	Caractères innovants.....	148
7.3	La nécessité d’utiliser une telle approche pour mieux maîtriser la dynamique urbaine.....	148
7.4	Limites du prototype développé .....	148
7.5	Problèmes généraux rencontrés .....	149
7.5.1	Manque de données.....	149
7.5.3	Problèmes liés à la plateforme GeOxygene .....	149
7.5.4	Temps de calcul des simulations .....	150
7.6	Perspectives de recherche .....	150
7.6.1	Perspectives interdisciplinaires .....	150
7.6.2	Vers une plateforme générique de conception par agents vecteurs multi-échelles pour la simulation urbaine .....	153
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES .....		155

ANNEXE A : .....	165
A.1 Diagramme de classes détaillé du modèle de simulation .....	165
A.2 Description détaillée des classes du modèle de simulation.....	166
ANNEXE B : .....	171
Code Java des classes du modèle d'interaction .....	171
ANNEXE C : .....	174
C.1 Table <i>fonction</i> .....	174
C.2 Table <i>influence</i> .....	176
ANNEXE D : .....	177
Classification hiérarchique des fonctions.....	177
CURRICULUM VITAE .....	181

# CHAPITRE 1 : INTRODUCTION

## 1.1 La ville en question

### 1.1.1 L'intérêt porté à la gestion urbaine

Le récent engouement des cybernautes pour le jeu *Monopoly City Streets*<sup>1</sup> témoigne de l'intérêt porté par les habitants à la ville et à sa gestion. En effet quelque temps après le lancement de la version en ligne du jeu (septembre 2009), le service s'est effondré en raison d'une fréquentation dépassant la capacité du serveur. Le jeu *Monopoly City Streets* utilise le service de cartographie Google Maps et permet aux joueurs d'acheter à peu près toutes les rues de la planète, d'y installer des bâtiments et de planifier la dynamique urbaine d'une façon grossière (fig. 1).



Figure 1: Le jeu *Monopoly City Streets*: création de bâtiments

Cet intérêt pour la gestion urbaine se justifie par le fait que les villes sont le centre de nombreux enjeux économiques, écologiques et sociaux qui touchent ses habitants. En outre étant donné l'ampleur de ces enjeux, la ville est devenue un objet d'étude primordial pour les chercheurs en urbanisme.

L'avenir et la gestion des villes est donc un sujet d'actualité. Plusieurs conférences internationales ont été récemment (Geoweb 2009, Urban Transport 2009, ...) dédiées à ce sujet. Comme déjà mentionné ci-dessus, cela s'explique par le fait que les villes sont le centre des activités économiques et sont à l'origine de la plupart des problèmes liés à l'impact sur l'environnement des activités humaines. En outre elles sont en continuelle croissance et hébergent la plupart des habitants de la planète.

<sup>1</sup>Site web (2009) : [http://www.futura-sciences.com/fr/news/t/internet/d/monopoly-city-streets-google-etend-le-monopoly-a-la-planete\\_20426/](http://www.futura-sciences.com/fr/news/t/internet/d/monopoly-city-streets-google-etend-le-monopoly-a-la-planete_20426/)

## CHAPITRE 1 : INTRODUCTION

### *La ville en question*

#### 1.1.2 L'urbanisation : un phénomène d'actualité et d'envergure mondiale

Les premières villes sont apparues vers 3000 ans av. J.C., ce qui coïncide avec l'émergence de l'agriculture. Les premières villes étaient composées d'un mur d'enceinte délimitant une superficie étendue et accueillant également une grande population (fig.2). L'apparition des villes est liée à la division du travail et à sa spécialisation [Bairoch, 1985].

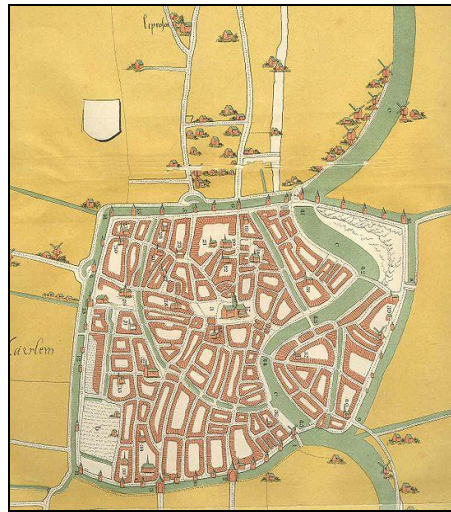


Figure 2: Ville de Haarlem en 1550 aux Pays-Bas

Aujourd'hui une ville est définie comme une zone agglomérée (fig. 3), étendue et fortement peuplée et concentrant la plupart des activités humaines : habitat, commerce, industrie, etc. [Paulet, 2009]. C'est une définition statistique qui peut notamment varier d'une région à l'autre. Divers champs du savoir s'appliquent à étudier la ville, notamment la sociologie urbaine et l'urbanisme. Les zones urbaines connaissent une expansion rapide au niveau mondial.



Figure 3: La ville de New York

Selon l'ONU [ONU, 2008], depuis 2008, plus de la moitié de la population humaine mondiale réside dans les villes. Dès lors on recherche des technologies innovantes pour relever les défis posés par cette croissance rapide. En effet cette croissance entraîne des changements dans les conditions de vie des



## **CHAPITRE 1 : INTRODUCTION**

### *Définition de la question de recherche*

habitants, notamment la pauvreté et l'exclusion, et des problèmes écologiques. Ainsi de nouvelles solutions sont à rechercher dans le domaine de l'aménagement urbain durable intégrant des savoir-faire provenant de divers membres compétents tels que des décideurs, des constructeurs, des architectes, des urbanistes, des ingénieurs, des politiciens, des informaticiens, etc. La présente thèse s'inscrit notamment dans cet effort de recherche de solutions pour développer une ville durable.

## **1.2 Contexte général de la thèse**

### **1.2.1 Le développement durable des villes**

Le terme « ville durable » désigne une ville qui respecte les principes du développement durable et qui prend en compte les enjeux sociaux, économiques, environnementaux et culturels de l'urbanisme. Ces enjeux dépendent de la ville et de sa taille, mais on retrouve souvent les thèmes de gouvernance, de réchauffement climatique, d'énergie, des déchets, des transports, des milieux (eau, air, sol) et de la biodiversité [Granier & Veyret, 2006].

Les villes actuelles sont notamment confrontées à l'étalement urbain et aux phénomènes de fragmentation écologique. Cela conduit à une ville dispersée consommatrice de sol et génératrice de déplacements. Le recours à des énergies renouvelables n'est pas une réponse suffisante aux dommages causés à l'environnement et l'aménagement du territoire doit être repensé dans les villes d'aujourd'hui [Bourdin et al, 2005].

Ainsi face à des problèmes de périurbanisation ou encore d'empreinte écologique, la manière classique de penser la ville semble avoir atteint ses limites. Les responsables de l'aménagement urbain souhaitent désormais construire des villes durables, en considérant leur impact et leur évolution sur le futur [Jouve & Lefevre, 2004].

Le concept de ville durable n'est pas clairement défini, car on ne dispose pas à ce jour d'indicateurs et de critères clairement mesurables. De plus il n'existe pas, à l'heure actuelle, un nombre élevé d'urbanistes et d'architectes formés selon les principes du développement durable.

La manière de penser la ville qu'ont les architectes qui ont travaillé sur le projet « Morphogenèse de la Métropole » (dans le cadre duquel cette thèse a été effectuée) est en accord avec cette nouvelle façon d'envisager la gestion de la ville selon une perspective durable.

La ville contemporaine (et le milieu urbain au sens large) est un système complexe dont il est devenu nécessaire de maîtriser l'évolution. La ville a souvent été négligée dans les mesures d'aménagement du territoire en Suisse. Néanmoins depuis le début du XXIème siècle, la Suisse tente de promouvoir une politique fédérale des agglomérations [Kaufmann et al, 2007]. Notamment dans le cadre de la politique des agglomérations, la Confédération suisse souhaite dorénavant intégrer davantage la problématique des agglomérations dans ses politiques sectorielles et encourager la réalisation de projets novateurs par le biais d'une politique incitative plus ciblée [Conseil Fédéral, 2001].

## CHAPITRE 1 : INTRODUCTION

### *Définition de la question de recherche*

#### **1.2.2 La simulation urbaine**

Le contexte de recherche général de ce travail de thèse concerne la simulation urbaine. La simulation urbaine fait partie du champ de la géosimulation. La géosimulation [Sanders, 2004] regroupe un ensemble de concepts et de méthodes associées combinant les champs de l'intelligence artificielle et des sciences de l'information géographique dans le but de simuler le comportement des systèmes spatiaux. L'approche utilisée par la géosimulation est de développer un modèle faisant référence à des objets élémentaires qui ont des comportements définis, sont capables d'action et d'interactions pouvant produire des formes spatio-temporelles interprétables à plusieurs niveaux d'observation [Sanders, 2004]. La modélisation des systèmes spatiaux passe souvent par une formalisation des comportements des objets suivant des règles et implique généralement le recours aux systèmes multi-agents. Le rôle des interactions entre les agents revêt une importance primordiale selon cette approche de modélisation et le résultat de ces interactions peut conduire à la formation de structures émergentes interprétables à plusieurs niveaux d'observation [Sanders, 2004].

Ainsi la démarche « bottom-up » devient une nouvelle approche de compréhension des systèmes spatiaux. Cette approche a connu une large utilisation dans le domaine de la simulation urbaine [Benenson et Torrens, 2004]. Les applications intègrent des échelles spatiales et temporelles variées. On peut citer comme exemple de ces applications la simulation du déplacement de foules pédestres [Antonini et al, 2006] ou le trafic automobile [El hadouaj et al, 2001] à plusieurs échelles de modélisation. Ces modèles intègrent des agents aux comportements simples interagissant et prenant des décisions et dont le comportement produit des phénomènes observables à plusieurs niveaux d'organisation. Les méthodologies employées sont traditionnellement les automates cellulaires (§ 3.7.1) et plus récemment les agents cellulaires (§3.7.2) qui permettent la modélisation de l'espace selon une grille de cellules pouvant changer d'état selon des règles de transition et selon un pas de temps définis. Dans l'objectif de reproduire un phénomène spatial simple un nombre limité d'agents est utilisé. En revanche si l'on cherche à modéliser un modèle complexe par rapport à la réalité il faut faire intervenir un nombre important d'agents. Les modèles que l'on peut formaliser sont dépendants des avancées technologiques dans les domaines des technologies de l'information et de la représentation géographique. Ces capacités de représentation peuvent s'étendre aux domaines de la visualisation 3D, utiles en urbanisme notamment dans le cadre de projets d'urbanisme.

Dans le cadre de notre travail de recherche nous nous intéressons plus particulièrement à la simulation urbaine des processus dynamiques à l'origine de la création des structures spatiales, de l'entité bâtiment à la métropole dans son ensemble, en passant par les groupements urbains d'objets bâtis. Les structures spatiales - et dans le cadre de notre recherche les structures urbaines - évoquent l'idée d'une entité organisée [Elissalde & Rhein, 2004]. L'espace urbain n'est pas composé d'un ensemble de lieux uniques dont la localisation est aléatoire. L'agencement de l'espace urbain dépend de choix successifs d'acteurs pour répondre au besoin de la maîtrise de l'espace, de même que de facteurs d'organisation échappant à une logique de gouvernance.

Les structures urbaines possèdent une stabilité et peuvent être étudiées par les géographes notamment [Elissalde & Rhein, 2004]. Une structure urbaine ne se réduit pas à sa géométrie ou à une morphologie

## **CHAPITRE 1 : INTRODUCTION**

### *Définition de la question de recherche*

statique mais doit également être comprise en fonction des liens entre les objets la constituant et également en fonction de son identité et de ses possibles influences sur son environnement immédiat. La structure urbaine doit être entendue comme un principe d'organisation des objets géographiques, lequel se manifeste par une forme géographique.

Notre recherche se base sur des lois dynamiques (§ 2.1) propres aux processus à l'œuvre dans l'espace urbain et contribuant à produire des structures urbaines. Ces lois dynamiques expriment l'existence dans l'espace urbain de déterminants concourant à la formation de structures urbaines. Ces lois dynamiques sont communément admises par un certain nombre d'architectes et d'urbanistes. Malgré tout leur définition peut varier d'un endroit à l'autre en fonction des valeurs en présence et de l'identité de l'espace urbain considéré.

Pour pouvoir modéliser les structures urbaines selon des lois dynamiques on doit faire appel à des savoirs interdisciplinaires intégrant des connaissances des architectes et urbanistes pour la formulation de lois dynamiques et des connaissances des experts en sciences de l'information géographique pour la modélisation informatique et la représentation de l'évolution dynamique des structures urbaines.

Ainsi notre travail de recherche se place dans un contexte fortement interdisciplinaire. En outre cette approche interdisciplinaire se révélant très pionnière, un certain nombre de connaissances fondamentales restent à explorer.

### **1.2.3 Nouvelles approches en planification urbaine**

Comme dit plus haut, les villes contemporaines sont relativement complexes et leur évolution reste difficilement maîtrisable à l'heure actuelle. «Le milieu [urbain] comme bien des organismes vivants, s'autotransforme. L'analyse et l'opérativité de ces états et leurs enchaînements nécessitent de considérer l'environnement naturel et construit comme une forme globale à programmer et projeter. ... L'échec de l'urbanisme entérine l'idée qu'il n'y a pas, pour l'heure, les outils théoriques adéquats pour penser la ville dans son ensemble et agir en conséquence. » [Berger et Nouhaud, 2004]. Les modes statiques (cartes, plans d'aménagement) de représentation et les stratégies de planification actuels ne semblent plus guère adaptés à la dynamique évolutive de l'espace urbain. De nouveaux outils sont par conséquent nécessaires pour pouvoir comprendre et gérer son développement. Ces outils permettraient notamment de représenter les transformations générées par les programmes architecturaux et d'acquérir une maîtrise renforcée sur la morphogenèse des métropoles et des structures urbaines.

Dans le cadre de cette problématique, les défis majeurs à relever sont dans un premier temps de comprendre et de modéliser l'espace urbain et plus précisément son comportement par le moyen d'une nouvelle représentation dynamique qui rompt avec les anciennes représentations statiques. Dans un deuxième temps, être capable de manière aussi précise et fiable que possible, grâce à ces nouveaux moyens, de prédire l'évolution future de la ville et cela dans une perspective de planification stratégique du milieu urbain.

Cette thèse souhaite répondre à cette demande en nouveaux outils de modélisation de la ville afin de permettre de mieux la comprendre et de la planifier.

## CHAPITRE 1 : INTRODUCTION

### Définition de la question de recherche

## 1.3 Le projet interdisciplinaire de recherche sur la métropole

### 1.3.1 Présentation du projet

Le projet interdisciplinaire de recherche [Plazanet, 2008] dans le cadre duquel s'est effectuée cette thèse a été réalisé au laboratoire UTA (Laboratoire de Projet Urbain, Territorial et Architectural) de l'EPFL. Ce laboratoire est actuellement dirigé par le Professeur d'architecture Patrick Berger<sup>2</sup>. Il s'intéresse depuis de nombreuses années aux processus morphogénétiques à l'œuvre dans le milieu urbain<sup>3</sup>. Le projet « Morphogenèse de la Métropole » s'est initié en 2004 (terminé en 2008) avec le soutien de l'EPFL, et depuis, de nombreux collaborateurs y ont participé, notamment des architectes et des ingénieurs.

Le Dr Corinne Plazanet a dirigé et coordonné l'équipe de recherche travaillant sur le projet « Morphogenèse de la Métropole ». Elle a notamment structuré et planifié le projet selon divers chantiers et problématiques [Plazanet, 2008]. La vue synthétique de l'articulation de ces problématiques est donnée par la fig.4. Chacun des chantiers sont notamment associés à divers collaborateurs. De plus amples informations concernant le projet « Morphogenèse de la Métropole » peuvent être trouvées dans le rapport final de recherche [Plazanet, 2008].

Le **Chantier Architecture** fait référence aux connaissances en architecture et en urbanisme. L'objectif est d'explorer les lois qui régissent la morphogenèse de la métropole, d'en faire une analyse qualitative et de les structurer [Plazanet, 2008].

Le **Chantier SIG** concerne la collecte de données telles que celles du cadastre ainsi que la structuration des données nécessaires à leur exploitation. En interaction avec un autre projet de recherche [Carneiro et al, 2008], une modélisation tridimensionnelle à haute résolution a pu être intégrée à notre plateforme et a notamment permis d'intégrer des données 3d à haute résolution dans le moteur de simulation.

Le **Chantier Simulation** concerne la conception d'un simulateur par systèmes multi-agents. Je me suis chargé essentiellement de cette partie et avais pour tâche la conception du simulateur multi-agents. Le modèle agents est réalisé sur la base du schéma de bases de données du chantier SIG. Les composants du système multi-agents ont été définis : comportement des agents et interactions. Ensuite ce modèle agents a été implémenté sur la plateforme de développement *GeOxygene* en faisant appel à différentes bibliothèques Java sont couplées au sein du même système. Une phase de simulations et d'expérimentations a été ensuite réalisée pour valider le simulateur.

---

<sup>2</sup> Patrick Berger, né en 1947 à Paris, est un architecte français. En plus de son activité d'architecte, il se consacre à l'enseignement et à la recherche, notamment à l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL). Ses travaux récents portent sur la morphogénèse des villes contemporaines et la matériologie de l'objet construit. Il est l'auteur de plusieurs livres et essais tels « Formes cachées, la ville », « La figure architecturale, un enjeu esthétique », « Figures de la monumentalité », « Panauti, une ville royale au Népal ». En 2004, il obtient le Grand Prix national d'architecture (Site web (2010): <http://www.patrickberger.fr/>).

## CHAPITRE 1 : INTRODUCTION

### Définition de la question de recherche

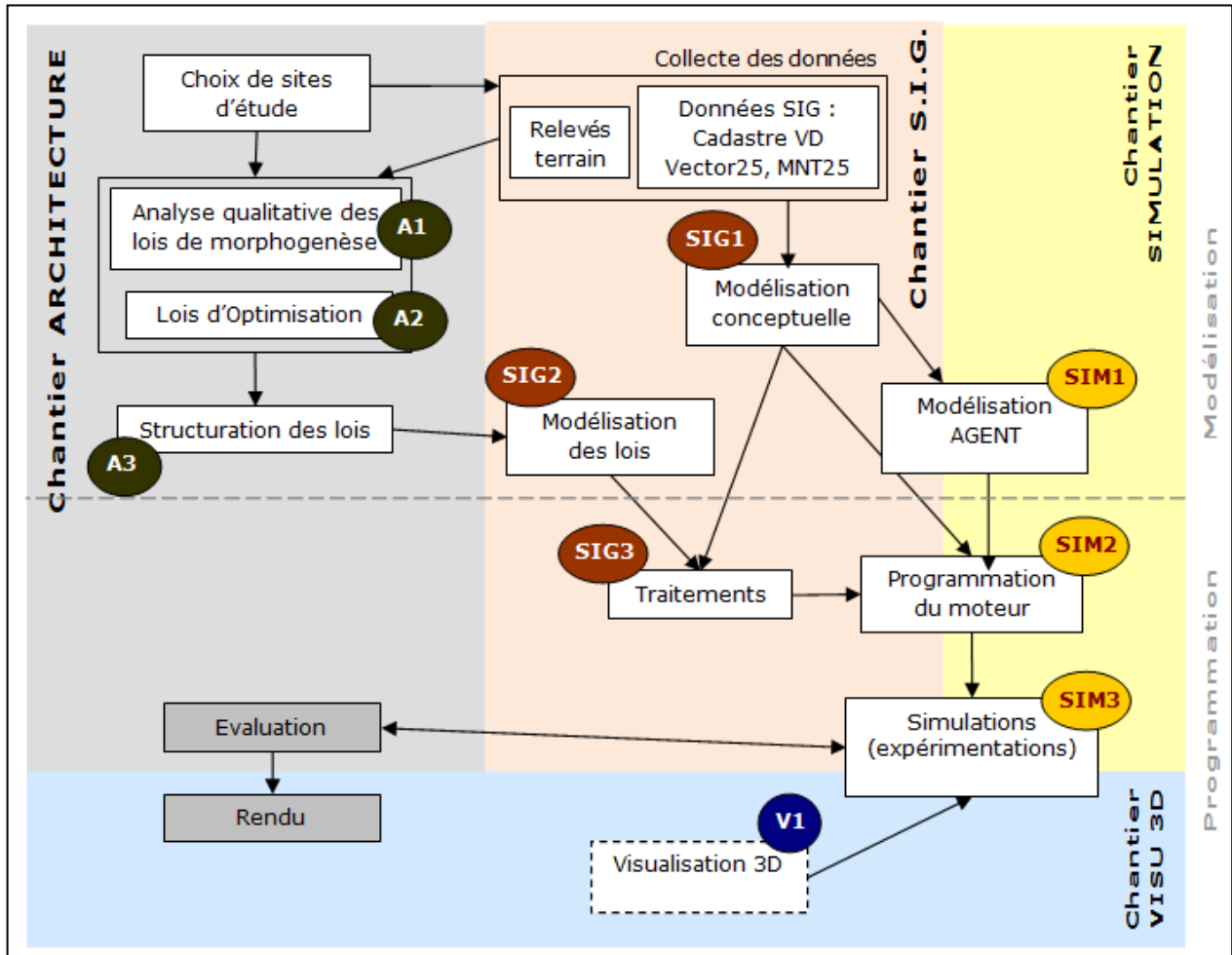


Figure 4: Schéma synthétique des chantiers du projet "Morphogenèse de la Métropole"[Plazanet, 2008]

Le **Chantier Visualisation** concerne la visualisation dynamique 3D des résultats de la simulation à plusieurs échelles. La visualisation dynamique devrait permettre une visualisation des simulations en temps réel et en jouant sur l'échelle d'affichage. La visualisation est notamment importante pour montrer l'impact des programmes architecturaux sur la morphogenèse urbaine. Pour des raisons de temps on n'a pas pu aboutir à une solution de visualisation dynamique. Notre recherche nous a permis seulement d'aboutir à une visualisation en différé et au format CityGML<sup>4</sup>.

On s'est efforcé au cours de ce projet interdisciplinaire de répondre à certains défis de la recherche urbaine actuelle tels que mentionnés ci-dessus. Le but général de ce projet est le suivant [Plazanet 2008]:

Face à la complexité structurelle de la métropole et à la difficulté à comprendre son comportement, il s'agit de développer une nouvelle forme de représentation phénoménologique et dynamique en recourant à la modélisation informatique. Cette modélisation fait appel à des

<sup>4</sup> Le CityGML est un modèle standard de représentation d'objets 3D urbains adopté par l'Open Geospatial Consortium en 2008 [Kolbe, 2008].

## CHAPITRE 1 : INTRODUCTION

### *Définition de la question de recherche*

compétences interdisciplinaires couvrant les champs de l'architecture (fournissant le savoir sur les lois du développement urbain) et des Systèmes d'Information Géographique. Cette nouvelle représentation dynamique de l'interaction entre les objets du milieu urbain devrait permettre d'étudier les lois de morphogenèse de la métropole et les processus d'organisation à l'œuvre dans le milieu urbain. Les résultats de cette étude pourraient déboucher sur de nouvelles formes de planification (et notamment stratégique) de la métropole. L'outil de simulation dynamique développé pourrait également devenir un outil d'aide à la compréhension et à la décision<sup>5</sup> pour les architectes et les urbanistes, notamment lors de l'implantation d'un nouveau programme, pour en évaluer l'impact, ou lors de l'implantation stratégique d'un nouveau programme afin d'obtenir une évolution souhaitée de la forme de la métropole.

Ce projet s'appuie en général sur l'hypothèse que les processus urbains peuvent être compris et simulés et que cela peut déboucher sur une meilleure compréhension de l'évolution de la ville et une meilleure stratégie de planification urbaine.

La présente thèse constitue une contribution d'ingénieur à un projet de recherche multidisciplinaire original initialisé par le Prof. P. Berger, co-directeur de cette thèse, relatif à l'étude de la morphogenèse urbaine. Il postule en particulier l'hypothèse d'une imbrication d'échelles du développement urbain déterminant chacune des processus qui lui sont propres. Une autre thèse, déjà soutenue avec succès par le Dr J.-J. Park formule et valide ces hypothèses de la morphogenèse urbaine.

### **1.3.1 Zone d'étude**

Pour des raisons de données à disposition [Plazanet, 2008], les zones d'étude choisies sont situées dans l'ouest lausannois. Les raisons du choix des zones d'étude présentées ci-dessous ne sont pas liées aux critères de validation du prototype. Le choix de la plus grande zone d'étude (encadré orange fig. 5) se justifie par le fait qu'elle est susceptible de subir de nombreux aménagements dans les prochaines années [Plazanet, 2008].

---

<sup>5</sup> On appelle outils d'aide à la décision (en anglais *Decision Support System* (DSS)) des outils, notamment informatiques, qui permettent de regrouper des données, d'en faire la synthèse et de dégager des tendances pour leur évolution future et aidant les décideurs à prendre des décisions avec une marge d'erreur plus réduite [Garnier, 2007].

## CHAPITRE 1 : INTRODUCTION

### Définition de la question de recherche

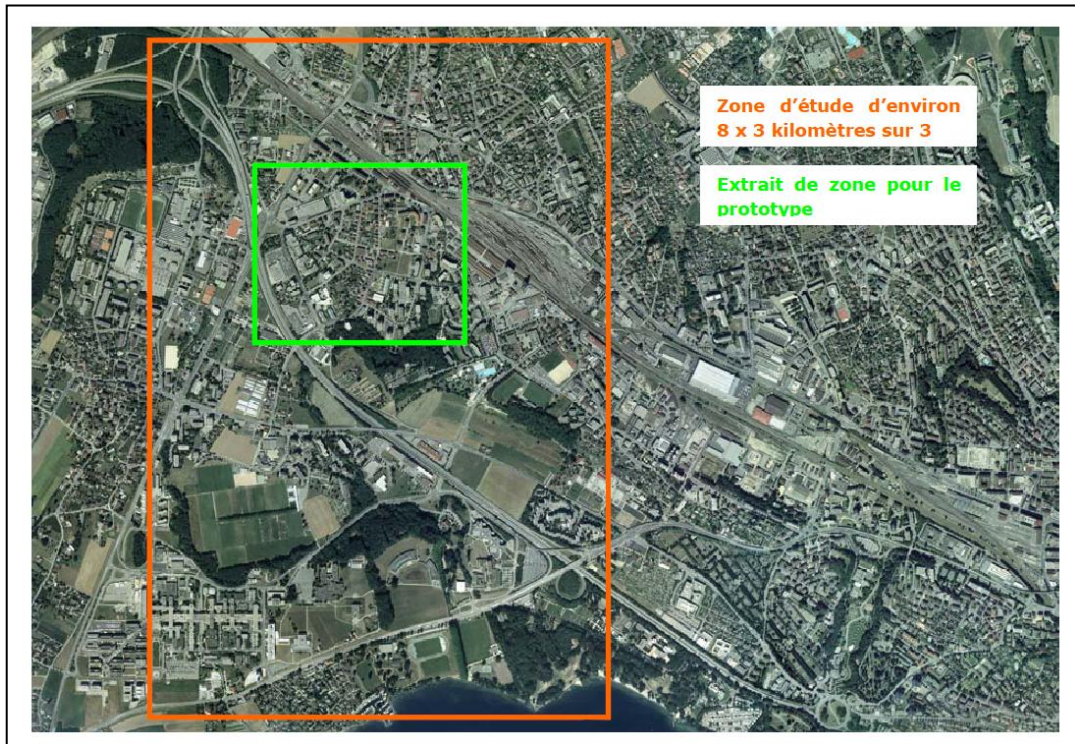


Figure 5: Extrait d'orthophoto numérique couleur de la zone d'étude [Plazanet, 2008]

En ce qui concerne l'étude sur l'extensibilité du prototype (cf. § 6.4), et notamment la visibilité et l'exposition solaire nous nous sommes restreints à une zone plus petite (encadré vert) à l'intérieur de la première zone.

### 1.3.2 Equipe ayant participé au projet

Plusieurs personnes ont participé, à des degrés divers, au projet de recherche sur la métropole [Plazanet, 2008] :

**Prof. Patrick Berger** : directeur du laboratoire UTA

**Dr Corinne Plazanet** : chef de projet

**Philippe Bonhôte** : collaborateur scientifique

**Dr Bassel Farra** : collaborateur scientifique

**Andrea Calenchini** : assistant

**Jong-Jin Park** : doctorant en architecture

**Vitor Silva** : doctorant en géomatique

**Janka Rahm** : graphiste

## CHAPITRE 1 : INTRODUCTION

### *Définition de la question de recherche*

Il faut essentiellement mentionner que le doctorant Jong-Jin Park avait pour objectif, dans le cadre de sa thèse, la découverte d'invariants de configurations optimales (symétrie) et leur introduction dans le moteur de simulation. De mon côté j'avais pour mission ce concevoir et d'implémenter le prototype de simulation multi-agents. Jong-Jin Park et moi avons travaillé en étroite collaboration tout au long de nos travaux de thèse respectifs.

### 1.3.3 Collaborations

#### **Laboratoire LaSIG, EPFL :**

Ce laboratoire est dirigé par le Prof. François Golay, directeur de cette thèse. Outre la fourniture de données et l'expertise concernant les logiciels SIG, ce laboratoire m'a permis de travailler en étroite collaboration avec le doctorant Claudio Carneiro pour l'exploitation de données LIDAR 3D et notamment pour le calcul de visibilité ou l'exposition solaire. En outre avec Claudio Carneiro, j'ai également exploité les indicateurs 3D pour l'extraction de groupes de bâtiments. Nos travaux en commun ont donné lieu à des publications diverses [Silva et al, 2008], [Carneiro et al, 2008].

#### **Laboratoire COGIT, IGN, France :**

Ce laboratoire est dirigé par le Dr Anne Ruas. Ce partenariat nous a permis d'avoir une expertise concernant le développement multi-agent vecteur. Il nous a notamment fourni un soutien important dans le cadre de l'utilisation de la plateforme *Open Source GeOxygene*

## 1.4 Définition de la question de recherche

En tant qu'assistant-doctorant j'ai participé tout au long de cette recherche à la modélisation de l'outil de simulation et à son implémentation logicielle sur la plateforme de recherche GeOxygene (cf. § 5.1.2). Dans ce contexte de recherche interdisciplinaire l'objectif principal de la présente thèse est le suivant :

*Concevoir un prototype de représentation phénoménologique et dynamique de la métropole par agents vecteurs multi-échelles et évaluer sa capacité à valider ou infirmer les hypothèses concernant les lois de morphogenèse de la métropole et notamment celle qui postule la capacité d'organisation dynamique du programme architectural.*

D'un point de vue du cadre de la recherche, cette thèse s'insère dans un contexte bien déterminé illustré par la fig. 6. En effet la thèse se base sur des postulats des architectes (et notamment ceux de Patrick Berger) travaillant sur le projet (flèche verte) sur les hypothèses de J.-J. Park [Park, 2009] (flèche bleue) et sur les connaissances des géomaticiens travaillant sur le projet dont Corinne Plazanet et Vitor Silva (flèche jaune), dans le but de construire un modèle du milieu urbain et d'aboutir à la conception d'un simulateur. Ce simulateur nous permettra de vérifier les hypothèses sur la ville (flèche rouge). Le



## CHAPITRE 1 : INTRODUCTION

### *Méthodologie employée pour répondre à la question de recherche*

processus de vérification des hypothèses peut aboutir à la formulation de nouvelles lois permettant éventuellement une redéfinition de l'architecture du simulateur. Ainsi cette thèse de doctorat a essentiellement pour objectif de démontrer la pertinence d'employer un simulateur par agents vecteurs multi-échelles pour vérifier les hypothèses sur la dynamique urbaine.

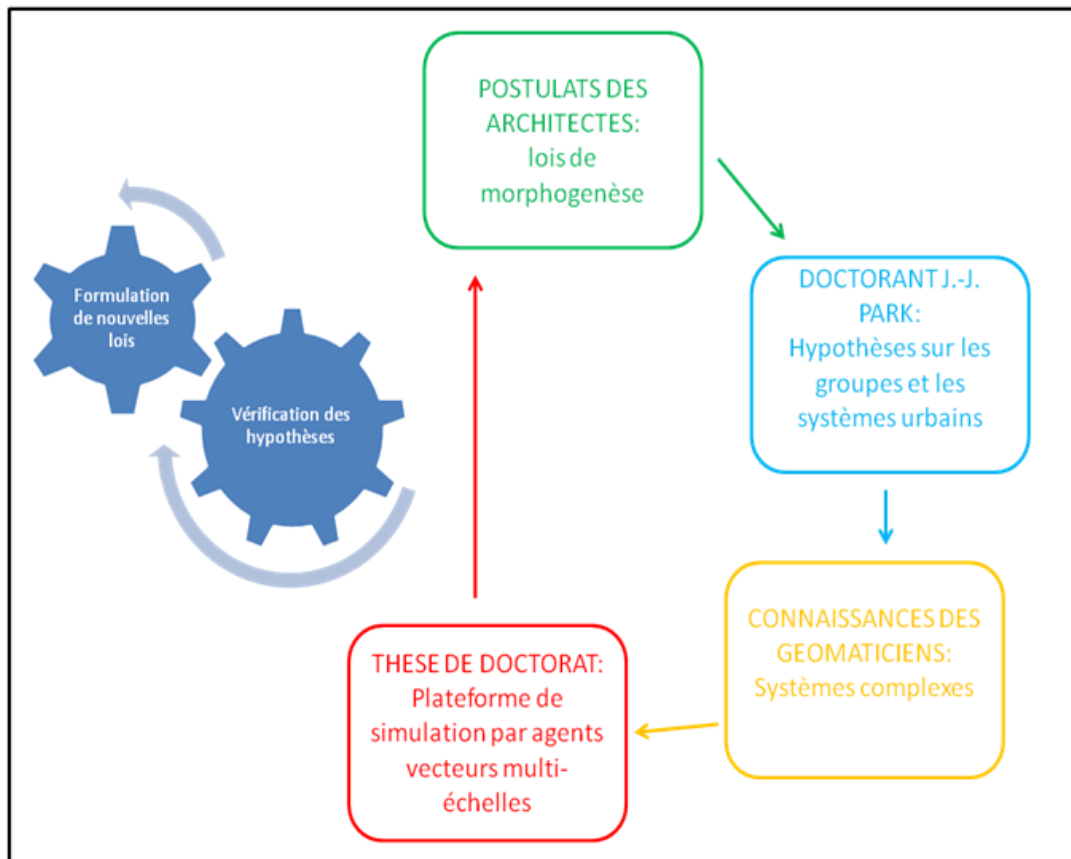


Figure 6: Contexte de recherche de la thèse

## 1.5 Méthodologie employée pour répondre à la question de recherche

La démarche employée pour répondre à notre question de recherche est semblable à la démarche utilisée dans les simulations informatiques classiques (nous nous sommes basés sur [Shannon, 1998]): La conception du modèle de simulation multi-agents repose ainsi sur une approche empirique, intégrant :

### 1. Définition du problème :

On a défini dans cette phase les objectifs de notre étude. Nos objectifs sont notamment de concevoir une plateforme de simulation par agents vecteurs multi-échelles qui nous permette de vérifier les hypothèses concernant les lois de morphogenèse.

### 2. Planification du projet :

## CHAPITRE 1 : INTRODUCTION

### *Méthodologie employée pour répondre à la question de recherche*

On a évalué les ressources humaines disponibles, notamment les diverses compétences en présence (connaissances des chercheurs travaillant sur le projet pouvant nous fournir des scénarios urbains notamment) et les ressources matérielles (puissance de calcul informatique disponible).

#### **3. Définition du système (chap. 4, § 4.2.2) :**

On a défini les aspects que l'on désiret étudier, de façon à élaborer le cadre de notre expérience ainsi que notre modèle conceptuel. On souhaite notamment étudier la morphogenèse de la métropole ainsi que la création de structures urbaines (groupes) par l'utilisation d'agents vecteurs multi-échelles.

#### **4. Formulation du modèle conceptuel (chap. 4, § 4.2.3) :**

On a défini les différentes entités composant le système à étudier ainsi que leurs interactions. On a modélisé le système urbain et ses composants selon une approche multi-échelles et en tant qu'entités possédant une intelligence et un comportement définis. Cette modélisation de l'urbain se base sur des hypothèses (postulats) (cf. chap. 2 et 3).

#### **5. Transcription du modèle (chap. 5) :**

On traduit notre modèle dans un langage de simulation de façon à l'implémenter sur ordinateur. On a ainsi conçu un prototype de simulation en langage de programmation Java basé sur les agents vecteurs multi-échelles. On a également développé un modèle d'interaction simple entre les agents du système (basé sur les lois de morphogenèse).

#### **6. Expérimentation (chap. 6) :**

On a réalisé des simulations sur ordinateur suivant des scénarios d'évolution de la ville. L'objectif a été d'évaluer par des scénarios d'évolution urbaine, faisant intervenir des interactions entre des agents communicants, la capacité des agents vecteurs multi-échelles pour comprendre et simuler la morphogenèse urbaine. Ces scénarios ont pour but de tester le prototype et de l'enrichir.

#### **7. Vérification et validation (chap. 6) :**

On a vérifié si les résultats étaient représentatifs du comportement de notre système. D'après les résultats obtenus on a pu déterminer si le simulateur développé était capable de représenter et de simuler l'évolution urbaine d'une part et de valider ou d'infirmer les hypothèses sur la dynamique du milieu urbain d'autre part. L'évaluation de ces deux aspects nous a permis de déterminer si notre prototype était valide. Pour des raisons de temps nous n'avons pas testé la validité de notre prototype dans le cas de la vérification d'hypothèses fausses.

Ces étapes de formulation, de modélisation et d'implémentation sont dépendantes les unes des autres dans le sens « top-down » mais également dans le sens « bottom-up », dans la mesure où une étape de design pourra induire des changements dans la compréhension ou la conception d'une étape la précédant chronologiquement (cf. § 1.4).

## CHAPITRE 1 : INTRODUCTION

### *Hypothèses et postulats de recherche*

## 1.6 Hypothèses et postulats de recherche

### 1.6.1 Définitions

Plusieurs termes utilisés dans le cadre de notre recherche nécessitent une définition précise étant donné que leur usage courant peut être ambigu. Nous définissons dans ce paragraphe les principaux termes clés utilisés et leur sens dans le cadre de notre recherche.

#### a) Métropole

Le terme *métropole* a été utilisé dans le cadre du projet de recherche sur la métropole. Nous donnons ici une définition générale de ce terme admise par un certain nombre de chercheurs.

En géographie le terme *métropole* (du grec *mêtêr* : mère et *polis* : ville) désigne généralement une ville particulière représentant la capitale politique ou économique d'un Etat ou d'une région. A l'échelle planétaire il désigne une ville de plusieurs millions d'habitants (10 millions selon l'ONU) regroupant d'importants centres de décision, de gestion et de transport. En général ce n'est pas seulement la taille qui est déterminante pour attribuer le caractère de métropole à une ville. Généralement une ville peut être considérée comme étant une métropole si elle possède les caractéristiques suivantes [Scott, 2001], [Monti, 1999]:

- Concentration de population importante
- Fonctions de gouvernance dans le domaine économique et le domaine financier
- Influence sur l'organisation des activités industrielles et tertiaires
- A la tête d'un réseau urbain
- Représentant un lien avec l'échelon le plus élevé (sauf pour le cas de la capitale nationale)
- Concentration d'emplois stratégiques

Le terme de *métropolisation* désigne le phénomène de formation d'une métropole par la création ou le renforcement de fonctions de gouvernance, de communication et d'emplois [Monti, 1999].

A une échelle nationale une métropole correspond souvent à la ville qui est en tête du réseau urbain national. On peut citer comme métropoles : Paris (métropole mondiale), Londres (métropole mondiale), Rome, Madrid, Zurich, New York, Montréal ou encore des métropoles régionales telles que Lyon, Toulouse, etc.

Il n'existe pas de définition concrète et universelle du terme *métropole*. Les définitions sont généralement nationales. En outre les indicateurs à disposition pour donner une définition concrète du terme métropole sont rares. La population résidente « est un des rares indicateurs universellement disponibles » [Gazel, 2001].

La métropole constitue dans le cadre de notre recherche l'espace urbain que nous modélisons. Les architectes travaillant sur le projet considèrent la ville de Lausanne et son agglomération, et notamment

## CHAPITRE 1 : INTRODUCTION

### *Hypothèses et postulats de recherche*

la commune de Chavannes, comme une métropole au sens de la définition donnée ci-dessus, bien qu'elle ne satisfasse pas au critère universel de population.

#### **b) Morphogenèse**

Le terme *morphogenèse* est également un terme clé utilisé dans le cadre du « Projet de Recherche sur la Métropole ».

De manière générale, par référence étymologique, on peut définir la morphogenèse comme le processus consistant à créer des formes. Le terme *morphogenèse* est couramment utilisé en sciences naturelles pour désigner les mécanismes naturels producteurs de formes : « réactions physiques ou chimiques donnant des minéraux de formes et de couleurs différentes ou comparables, influence des vents sur la mer ou le désert productrice d'ondes, évolution des génomes produisant des êtres vivants aux propriétés diverses, etc. » [Baquiast, 2004]. Elle désigne en biologie le processus de développement des formes au cours de l'embryogenèse et en sciences de la terre le processus de formation du relief de l'écorce terrestre [Stevens, 1978].

Le terme *morphogenèse* est désormais aussi utilisé en urbanisme pour désigner le processus de création d'un ensemble de formes urbaines (théorie de la morphogenèse urbaine). A ce sujet [Baquiast, 2004] note que : « une fois que la science commence à comprendre la façon dont la nature a sélectionné certaines formes et pas d'autres, aussi bien dans le monde physique que dans le monde biologique, elle s'applique à transposer les mécanismes correspondants en vue de résoudre des problèmes d'ingénierie ».

Dans le cadre de notre recherche on utilise l'association des termes *morphogenèse* et *métropole* dans l'expression *morphogenèse de la métropole* pour désigner la création de la forme physique de la métropole due à sa croissance naturelle en fonction des contraintes du milieu.

#### **c) Programme architectural**

En architecture un programme architectural est défini comme un bâtiment ou un ensemble de bâtiments possédant des « fonctions » (cf. annexe C.1) correspondant à leur usage (commerces, écoles, hôpitaux, etc.) et dont l'emplacement géographique a été programmé par un projet d'architecture. Un programme architectural a généralement une influence sur l'évolution de la ville (cf. § 2.1.6). Cette définition reste sujette à des variations de formulation.

### **1.6.2 Postulats**

Notre travail de recherche se base sur des hypothèses que nous admettons dans un premier temps comme *postulats*. Une hypothèse est définie comme une affirmation qui peut être testée (vérifiée ou réfutée). Elle peut ainsi être mise à l'épreuve de nouveaux faits. Un postulat est un principe qui est admis comme vrai sans être démontré. Un certain nombre d'hypothèses seront admises par nous comme des postulats, car nous ne chercherons pas, dans le cadre de cette thèse, à les vérifier toutes. En revanche, les utilisateurs futurs du prototype eux-mêmes devront décider, grâce à l'outil de simulation mis à leur disposition, de la validité de leurs hypothèses.

## CHAPITRE 1 : INTRODUCTION

### *Hypothèses et postulats de recherche*

Tout un ensemble de postulats concernant la métropole et sa dynamique et donné par l'ensemble des chercheurs travaillant sur le projet est admis dans notre démarche de modélisation de la métropole et d'implémentation du système de simulation.

Il est vraisemblable et légitime d'utiliser ces postulats car ils reposent d'une part sur l'expérience des collaborateurs travaillant sur le projet et d'autre part sur les connaissances acquises par les urbanistes depuis de nombreuses années et désormais partagées par un certain nombre de chercheurs.

La métropole est un espace géographique où l'on trouve de nombreux éléments en interaction tel des bâtiments, des personnes ou des services. On considère la métropole comme un système complexe. Si l'on prend les activités qui se déroulent dans la ville séparément on peut bien les comprendre et les organiser mais si on la considère dans sa globalité alors son comportement est relativement complexe et difficile à prévoir. La *complexité* est une notion utilisée dans divers champs du savoir, notamment en épistémologie, en physique et en informatique et revêt différentes acceptions en fonction de ces domaines de connaissance. De manière générale un système montre de la complexité s'il comporte un nombre important d'éléments en interaction. Il existe une part de variabilité dans cette définition relativement au nombre d'éléments et aux types d'interaction.

Selon [Verteegh, 2005], « la réalité territoriale et son *comportement* relèvent clairement de la complexité. Premièrement il semble évident qu'un urbanisme par l'équilibre, la stabilité et la dynamique déterministe, assimilable à la tradition scientifique de la physique du XIXe siècle, ne s'y applique guère. » D'autres auteurs, dont [Batty, 2005] considèrent également la dynamique urbaine au regard de la théorie des systèmes complexes.

Selon [Berger et Nouhaud, 2004] la ville montre des aspects d'auto-organisation comme un système complexe adaptatif : « Le dessin d'une ville, sa forme matérielle, est le résultat d'un certain nombre d'évènements volontaires, constructions, destructions, augmentations, et d'évènements inattendus, incendies, catastrophes naturelles. Entre ces deux familles d'évènements dont les formes sont perceptibles et interprétables, le milieu physique se transforme de façon auto-organisée, c'est-à-dire hors de notre volonté, de façon insensible et continue jusqu'à une crise, visible et presque toujours globalement interprétable. » Le terme d'*auto-organisation* se réfère à un processus dont l'ordre est croissant et n'est pas gouverné par une action extérieure. On trouve ce concept notamment en biologie et en sciences sociales. Le formalisme de modélisation souvent associé est l'automate cellulaire (cf. § 3.7.1).

La métropole contemporaine peut être vue comme un système complexe possédant une intelligence collective et un fonctionnement semblable à celui d'un organisme<sup>6</sup> vivant auto-organisé et s'adaptant aux contraintes de son milieu de vie. Verteegh [Verteegh, 2005] le décrit comme un « processus de type biologique, fondé sur une autogenèse d'ordre réticulaire, fait de structures émergentes, de singularités et de verrouillages ». Selon [Versteegh, 2005] « ce système est *adaptatif* dans le sens où il ne se

---

<sup>6</sup> En biologie un organisme est défini comme un système complexe évolutif composé d'éléments en interaction fonctionnant comme un ensemble stable.

## CHAPITRE 1 : INTRODUCTION

### *Plan du document*

contente pas de répondre passivement aux événements de la façon dont un caillou peut rouler lors d'un séisme, mais il tourne activement les événements à son avantage. En témoigne la durabilité des faubourgs, ou encore la continuelle reprogrammation urbaine que l'on pourrait qualifier de dynamisme qui lui permet de maintenir un équilibre d'ordre et de chaos, où les composants du système ne se figent jamais véritablement, ni ne se dissolvent en turbulence. Car l'une des constantes de l'urbain est bien cette reprogrammation continue, spontanée et autogène».

Les interactions entre les bâtiments (qui peuvent abriter plusieurs fonctions), les réseaux et l'environnement naturel dans le système complexe que représente la métropole se déroulent à plusieurs échelles, du niveau local au niveau global, ce qui accroît la complexité de sa dynamique.

En outre la métropole contemporaine peut être vue comme un *écosystème* dont le comportement est régi par des lois de morphogenèse à plusieurs échelles. Cet ensemble de lois oriente son comportement de l'échelle locale à l'échelle globale. Ces hypothèses portant sur les lois sont admises par une école d'architectes et d'urbanistes et notamment par Patrick Berger.

Pour conclure il est admis dans le cadre du projet de recherche sur la métropole que la dynamique multi-échelles de la métropole obéit aux postulats suivants :

- A l'**échelle locale** (échelle du quartier, etc.) la localisation d'un bâtiment et des programmes architecturaux dans l'espace obéit à des lois de morphogenèse : sa localisation va être déterminée par des influences présentes dans le territoire telles que d'autres bâtiments, des réseaux ou l'environnement naturel. Ces influences peuvent être positives ou négatives selon la fonction du bâtiment lui-même. Ce n'est pas exclusivement le choix des architectes et des planificateurs qui dicte l'emplacement d'un bâtiment dans le territoire.
- A l'**échelle globale** (ou régionale) la ville elle-même oriente la localisation des bâtiments et des programmes. Cette influence est due à son identité (histoire, valeurs, etc.), à sa morphologie ainsi qu'aux autorités gouvernantes présentes à cette échelle.

## 1.7 Plan du document

La suite de ce document est structurée de la manière suivante :

**CHAP. 2** : Lois de morphogenèse et formes d'organisation dans la ville

**CHAP. 3** : Etat de l'art

**CHAP. 4** : Modélisation multi-agents du système urbain

**CHAP. 5** : Conception et implémentation du prototype

**CHAP. 6** : Simulations et validation

**CHAP.7** : Conclusion et perspectives

## CHAPITRE 2 : LOIS DE MORPHOGENESE ET FORMES D'ORGANISATION DANS LA VILLE

*On décrit dans ce chapitre les principales lois de morphogenèse définies par les chercheurs travaillant sur le projet ainsi que les formes d'organisation. La modélisation et la conception du simulateur se base sur ces lois. Le simulateur pourra ensuite, en retour, nous permettre d'explorer ces lois, éventuellement de les modifier et de permettre de les valider.*

### 2.1 Lois de morphogenèse

La morphogenèse est régie par des lois simples qui orientent son développement. Ces lois peuvent être définies pour aboutir à un ensemble structuré qui peut être ensuite utilisé dans la modélisation du système que représente la métropole.

Une *loi* est « une formule générale énonçant une relation constante ou habituelle entre des phénomènes. Le terme de loi est aussi employé pour désigner des règles de comportement invariantes dans le temps et l'espace comme la "loi du moindre effort", qui postule qu'en moyenne c'est la plus grande proximité qui est privilégiée dans la localisation des activités humaines [...]. En géographie le terme de loi est souvent considéré comme trop *fort* et remplacé par règle, car les relations observées n'ont pas la précision des lois physiques. Les lois expriment cependant l'existence de déterminations en géographie, même si celles-ci ne sont pas connues ou mesurées avec précision, et s'il entre dans leurs effets une part plus ou moins grande de hasard et d'indétermination. » [Pumain, 2004].

Les modèles en géographie sont des lois qui gouvernent l'organisation de l'espace. On peut citer par exemple le modèle gravitaire qui sera évoqué plus loin dans ce document.

Peu de travaux sur la morphogenèse ont été réalisés à ce jour. Quelques travaux concernant la morphogenèse ont été réalisés dans quelques villes comme Paris ou Lyon mais sans formuler de règles générales concernant le processus. Christopher Alexander [Alexander, 2005], [Alexander, 1987], [Alexander, 1979] est un des pionniers de l'étude de la ville du point de vue de ses configurations et de ses lois. La définition des lois de la morphogenèse se base sur ses travaux.

Les lois de morphogenèse qui ont été identifiées au cours de cette recherche constituent un groupe de lois simples. En effet selon [Basquiast, 2004] : « on se limitera aux processus génériques, mettant en œuvre des règles simples dont la combinaison aboutira à la production de formes complexes. Ce seront ces règles qui nous intéresseront, puisqu'elles permettront de comprendre et le cas échéant reproduire l'infinie variété des objets du monde, sans s'obliger à étudier les caractères propres de chacun de ceux-ci».

Ces lois ne sont pas stables, elles peuvent varier dans le temps en fonction de divers paramètres, notamment en fonction des valeurs en cours dans le milieu urbain.

## CHAPITRE 2 : LOIS DE MORPHOGENESE ET FORMES D'ORGANISATION DANS LA VILLE

### *Lois de morphogenèse*

Les lois de morphogenèse ont été établies par les chercheurs travaillant sur le projet et d'après leurs connaissances pratiques et théoriques ainsi que par différents étudiants travaillant à l'atelier du professeur Patrick Berger.

Les lois de morphogenèse ont ainsi été énoncées. Elles régissent la dynamique des objets constituant la métropole (formation, conservation, disparition, changement de fonction, désaffectation, stabilité/instabilité, continuité/discontinuité, etc.) et leur variation dans le temps et selon les valeurs culturelles [Plazanet, 2008].

A partir d'une analyse qualitative, nous avons pu distinguer 5 grands types de lois dans le système [Plazanet, 2008]:

- **Croissance** : Apparition de services avec la croissance de la population (par exemple création d'une école si l'augmentation de la population dépasse un certain seuil).
- **Stabilité** : durée de vie déterminée pour les agents.
- **Influence fonctionnelle** : attraction ou répulsion entre les programmes (un logement est par exemple attiré par une école ou un commerce), voisinage pouvoir symbolique de certains éléments naturels ou construits (par exemple une montagne ou une cathédrale).
- **Contraintes physiques** : distance entre voisins, pente, visibilité, exposition au soleil, etc.
- **Lois morphologiques** : optimisation des formes liées à la répartition spatiale des bâtiments, notamment création de formes régulières, triangles, carrés, etc.

Ces lois ne sont pas exhaustives. Une analyse quantitative par l'exploration de données spatiales existantes et des expérimentations (simulations) sur des zones urbaines différentes permettraient de mieux définir les lois énoncées.

Les lois de morphogenèse présentées ci-dessous définissent à un niveau conceptuel certaines règles du comportement de notre système. Les scénarios d'évolution qui seront présentés plus loin (chap.6) sont en accord avec ces lois.

### **2.1.1 La croissance**

De manière générale, les systèmes urbains sont en continuelle croissance en fonction du temps. Ce facteur doit donc être pris en compte dans la dynamique évolutive du système que nous souhaitons modéliser. Nous nous focalisons dans le cadre de cette thèse sur la création des bâtiments exclusivement, la création des autres éléments matériels (tels que routes, ponts, etc.) ne sera pas considérée dans cette première modélisation du système pour des raisons de temps à disposition.

La croissance de notre système représentant la ville est définie dans un premier temps comme la croissance du nombre de logements. Ce nombre dépend de la croissance du nombre d'habitants.



## CHAPITRE 2 : LOIS DE MORPHOGENESE ET FORMES D'ORGANISATION DANS LA VILLE

### Lois de morphogénèse

Dans la commune de Chavannes-Près-Renens, qui sera notre zone d'étude, il est prévu de bâtir environ 300 logements par an. La proportion des types de logements à créer est la suivante [Plazanet, 2006]:

- 1% de villas
- 99% d'habitations forte densité

Etant donné que le nombre de logements à créer n'est pas fixé précisément, mais est sujet à une variation statistique, on introduit une variation aléatoire pour la création de logements. Le nombre de logements à créer peut ainsi varier selon un intervalle. Le nombre de logements créés par année peut être défini par la formule empirique suivante :

$$\text{Nombre de logements à créer} = 300 * e,$$
$$e = [0.9, 1].$$

La variable  $e$  représente la probabilité de création de logements, variant entre 90% et 100%.

### 2.1.2 La création de services

Avec la création de logements, les services (écoles, hôpitaux, etc.) apparaissent « naturellement ». Leur création se fait selon des seuils définis et en fonction de la valeur de la population. Par exemple la création d'une école requiert une population de 2000 habitants, la création d'un supermarché 3000 habitants. Chaque fonction (école, supermarché,...) est associée à un nombre d'habitants (cf. annexe C.1) qui détermine son seuil de création.

La création d'une école peut par exemple s'exprimer par la règle suivante (fig.5):

**Si** nombre d'habitants > population \*(1+ nombre d'écoles)

**Alors** création d'une école

Ainsi le nombre d'écoles augmente par paliers (fig.7).

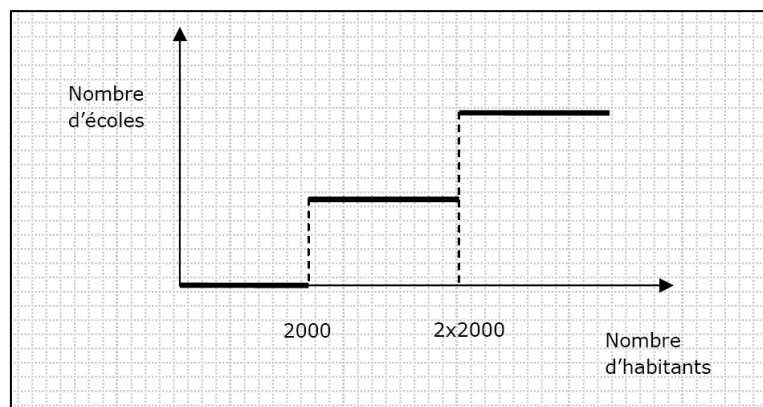


Figure 7: Règle de formation des services. Exemple de l'école [Plazanet, 2008]

## CHAPITRE 2 : LOIS DE MORPHOGENESE ET FORMES D'ORGANISATION DANS LA VILLE

### *Lois de morphogenèse*

Cette règle s'applique à toutes les fonctions. Le paramètre *population* varie suivant la fonction considérée.

Ces règles ne sont pas absolues. Ainsi certaines fonctions telles que des gares peuvent apparaître sans dépendre d'un seuil donné de population.

### **2.1.3 La stabilité du système (espérance de vie)**

Chaque bâtiment associé à une fonction possède un âge et une espérance de vie (stabilité) qui correspond à un nombre d'années. Si le bâtiment atteint son espérance de vie maximale alors il disparaît. On a ainsi la règle suivante :

*Si âge du bâtiment > stabilité alors destruction du bâtiment*

Par exemple les habitations forte densité disparaissent après 50 ans d'existence, alors que les supermarchés disparaissent après 20 d'existence. Les églises ont une très grande espérance de vie (1 000 ans), de même que les lacs (100 000).

### **2.1.4 Evènements liés à des prises de décision**

Certains événements sont dus à des prises de décision faites au niveau de l'échelon décisionnel de la ville (échelle macro, cf. § 4.3.3). La ville peut prendre des décisions (soumises à une certaine probabilité) telles que :

- **Changement de fonction d'un objet du territoire** : par exemple une autoroute peut se transformer en une route avec une certaine probabilité.
- **Changement de type d'affectation** : par exemple transformation de bosquet en forêt.

### **2.1.5 Autres évènements**

Ces évènements ne seront pas considérés dans ce premier prototype mais seront à modéliser dans une phase de développement ultérieur.

- **Augmentation du taux de croissance de la population.**
- **Catastrophes naturelles**: inondations, glissement de terrain, tremblement de terre.
- **Changement de la valeur de l'influence** : par exemple les zones vertes peuvent tout à coup avoir moins de valeur pour les habitations de type logement.
- **Changement de pouvoir symbolique** : perte d'intérêt de la vue sur les églises par exemple.

### **2.1.6 Adéquation aux parcelles et à la zone d'affectation**

En principe les bâtiments devraient être construits dans les parcelles et en respectant la distance minimum de séparation aux limites de la parcelle. En outre les fonctions des bâtiments à construire devraient correspondre à la dénomination légale de la zone d'affectation : notamment les usines devraient se trouver sur une zone industrielle, une villa sur une zone d'habitation faible densité, etc. Ces

## **CHAPITRE 2 : LOIS DE MORPHOGENESE ET FORMES D'ORGANISATION DANS LA VILLE**

### *Formes d'organisation dans la ville*

contraintes ne sont pas prises en compte dans le cadre du projet étant donné que ces règles subissent fréquemment des modifications [Plazanet, 2008]. Il est évident que d'un point de vue urbanistique il est très important de prendre en compte le parcellaire car il est fortement contraignant, notamment en ce qui concerne sa valeur foncière, mais pour des raisons de simplification nous avons choisi de ne pas tenir compte des parcelles. L'impact d'un tel choix sur le résultat des simulations peut être plus ou moins important, mais nous nous situons à une échelle méso en ce qui concerne la validation du simulateur. Le fait de ne pas prendre en compte les parcelles peut avoir un impact important sur la localisation précise des groupements urbains, mais un impact moins important sur leur forme générale, qui est de nature qualitative. En effet nous pensons à priori qu'une parcelle peut venir perturber l'emplacement et la configuration d'une figure d'organisation sans modifier radicalement la nature de cette dernière : une organisation des bâtiments selon une figure géométrique carrée conservera à priori cette particularité.

### **2.1.7 La fonction d'organisation dynamique du programme architectural**

Les programmes architecturaux orientent le développement de la ville. La ville s'organise et se crée sa forme en fonction de ses programmes. L'apparition d'un programme dans le système va modifier positivement ou négativement la satisfaction (cf. § 4.3) des bâtiments situés dans le voisinage, entraînant éventuellement leur disparition ou la création de nouveaux services. Par exemple la construction d'une gare (programme architectural) va entraîner l'apparition de bureaux dans le voisinage. En effet l'influence de la gare sur les bâtiments de bureaux étant très forte, ces derniers ont une probabilité élevée de se créer à proximité car leur satisfaction sera augmentée. Un autre exemple : l'augmentation du nombre de logements à un endroit donné aura pour effet de créer de nouveaux services à proximité, cette « pression » sera augmentée si ces logements font partie d'une structure urbaine telle qu'un quartier. Ainsi une fonction donnée aura tendance à « attirer » les influences positives et à « éloigner » les influences négatives.

## **2.2 Formes d'organisation dans la ville**

On peut observer [Park, 2009] dans la ville la présence de formes simples telles que des lignes, des carrés, des cercles, etc. Ces formes sont souvent liées à une organisation spatiale de nature anthropomorphique.

### **2.2.1 Groupe d'Habitats [Park, 2009] :**

Un groupe désigne un ensemble de bâtiments de même fonction proches géographiquement, de répartition homogène avec des caractéristiques de forme similaires (surface, complexité, etc.) et partageant une même identité.

Le doctorant J.-J. Park s'est intéressé plus particulièrement aux groupes d'habitat (GH) et les a définis de la manière suivante :

$$\mathbf{GH} = \{\mathbf{H}_n \mid n \geq 3\}$$

Avec les notations: **H**: Habitat ; **n**: nombre d'éléments du groupe.

## CHAPITRE 2 : LOIS DE MORPHOGENESE ET FORMES D'ORGANISATION DANS LA VILLE

### *Formes d'organisation dans la ville*

Une hypothèse importante admise par [Park, 2009] est que la complexité des activités humaines est basée sur une géométrie naturelle ou sociale (forme anthropologique) participant à la création de formes (groupes) urbaines liées à ces activités. En outre les villes peuvent se développer naturellement en suivant des principes de symétrie basés sur ces formes anthropologiques et qui sont le résultat d'une économie d'espace, d'énergie et de matière. Si une forme apparaît et s'avère être optimale, il y a une forte probabilité qu'elle réapparaisse à une autre résolution adaptée au nouveau contexte. Cela peut être considéré comme un processus naturel d'optimisation.

Même si l'on considère en général que les villes contemporaines sont chaotiques même à un niveau intermédiaire (correspondant au niveau du quartier), en réalité on peut remarquer des structures régulières et symétriques dans l'habitat qui reflètent une organisation basée sur des formes géométriques simples. Ce phénomène nous permet de mettre en évidence que l'habitat a tendance à s'organiser en groupes de bâtiments. Il est ainsi possible de considérer la ville comme une totalité d'individus (bâtiments) qui se regroupent naturellement selon des critères de proximité et d'accessibilité aux services (commerces, écoles, bureaux, etc.).

En observant ces groupes dans différentes zones métropolitaines, on remarque qu'en général ils peuvent être divisés en figures géométriques simples (fig.8): ligne, triangle ou carré. [Park, 2009] montre que ces groupes d'habitation peuvent être décrits par des invariants de forme définis par plusieurs composants. Ces formes ont en outre une dynamique propre et peuvent se compléter, s'étendre, se densifier selon les contraintes de l'environnement. En répétant les figures simples correspondant à des invariants, il est possible d'en construire des formes plus complexes en appliquant des transformations géométriques telles que la translation, la rotation, etc. [Park, 2009].

Les groupes perpétuent leur dynamique en ajoutant ou en supprimant des voisins selon les changements dans leur environnement. On a pu observer des règles de formation des groupes qui induisent les lois de localisation locale des bâtiments d'habitation. L'observation de « l'ouest Lausanne » en tant qu'étalement urbain ont permis de déduire les lois de croissance suivantes [Park, 2009] [Plazanet, 2008]:

- la complétude : action de compléter les groupes d'habitat pour former les figures élémentaires de lignes de carrés ou de triangles
- l'extension : action d'accroître les groupes à leurs extrémités
- la densification : action de remplir un espace urbain délimité (ilot de rues par exemple) par la complétude et/ou l'accroissement des groupes

**CHAPITRE 2 : LOIS DE MORPHOGENESE ET FORMES D'ORGANISATION DANS LA VILLE**  
*Formes d'organisation dans la ville*

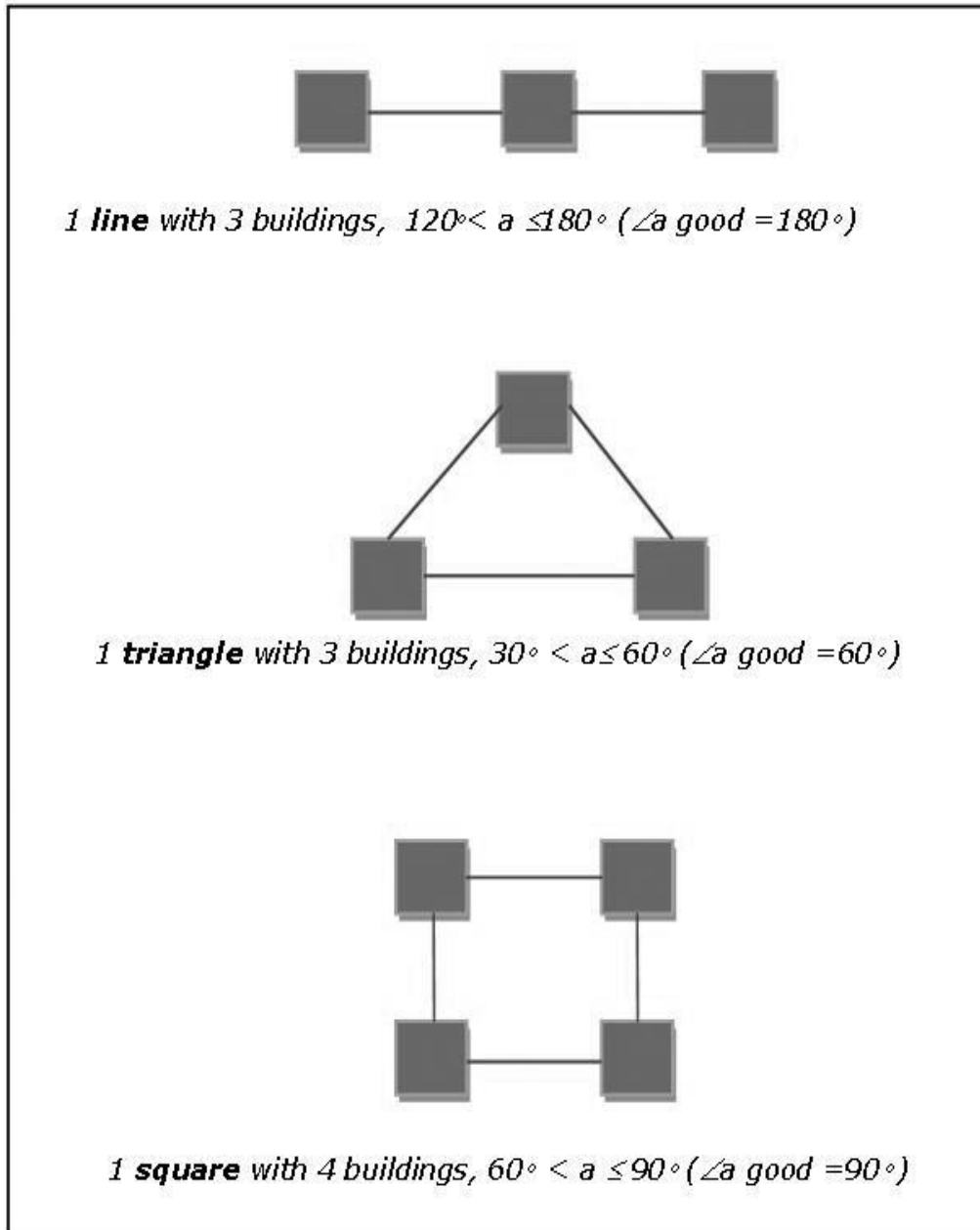


Figure 8: Les 3 figures d'organisation élémentaires [Park, 2009]

On a remarqué que l'ensemble des individus qui se transforment selon ces lois se recompose toujours en cherchant une distance régulière et équilibrée qui correspond à la densité actuelle [Park, 2009] [Plazanet, 2008].

La fig. 9 montre un exemple de complétude et d'extension.

**CHAPITRE 2 : LOIS DE MORPHOGENESE ET FORMES D'ORGANISATION DANS LA VILLE**  
*Formes d'organisation dans la ville*



Figure 9: Commune de Saint-Sulpice dans l'ouest lausannois en 1900 (à gauche) et en 1940 (à droite) [Plazanet, 2008]

La fig. 10 illustre les lois de complétude et d'extension des groupes d'habitat, telles que définies par Jong-Jin Park [Park, 2009].

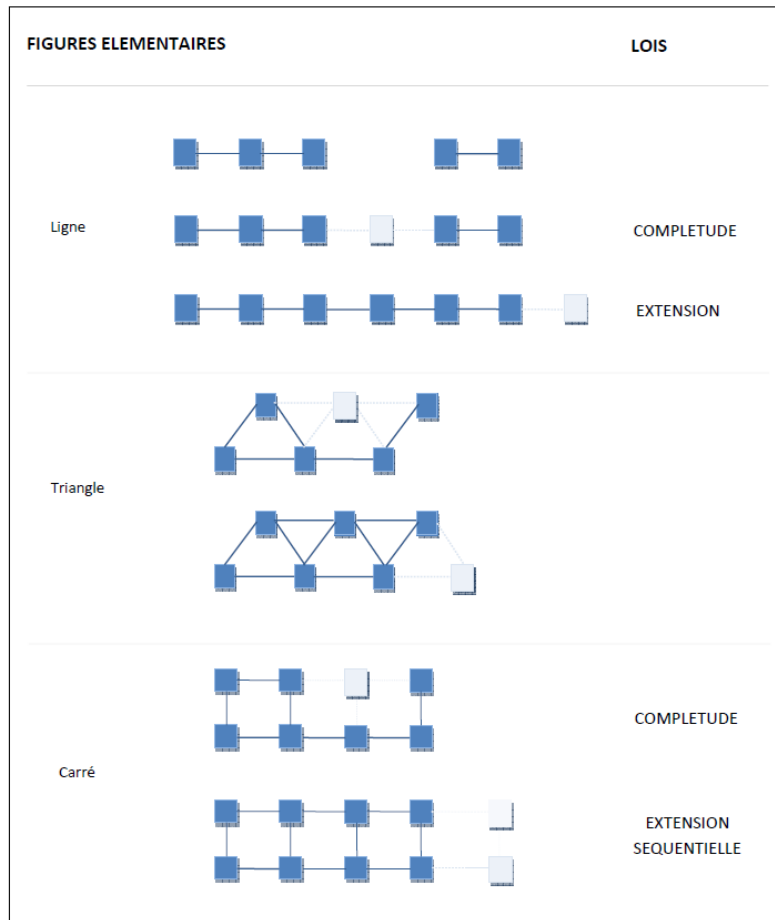


Figure 10: Illustration schématique des lois de complétude et d'extension des groupes d'habitat

## CHAPITRE 2 : LOIS DE MORPHOGENESE ET FORMES D'ORGANISATION DANS LA VILLE

### *Formes d'organisation dans la ville*

#### 2.2.2 Les systèmes urbains [Park, 2009]

Les chercheurs travaillant sur le projet ont également relevé l'existence de systèmes urbains. Ces systèmes peuvent devenir des quartiers, s'ils acquièrent une forte identité, et ont une influence déterminante sur leur environnement. Comme dit ci-dessus les groupes d'habitat peuvent être rattachés à un espace public (tel que rue, place ou parc) et à des équipements. Ils forment dès-lors des systèmes urbains.

Plus formellement un système urbain (S) peut être défini de la manière suivante :

Avec :

**EP** : ensemble des espaces publics (rue, place ou parc). Un espace public est « un lieu ouvert caractérisé par un flux important de personnes utilisant les services publics à disposition ou par une forte concentration d'équipements qui font vivre les activités publiques et privées du voisinage. Ce peut être une rue, une place ou un parc public».

**E** : ensemble des équipements. Les équipements représentent des bâtiments à usage collectif qui permettent d'assurer les services publics : administration, éducation (école, université), santé (dispensaire, hôpital), commerce, travail (atelier, usine, bureau), culture (théâtre, cinéma), religion (lieu de culte), etc.

**GH** : ensemble des Groupes d'Habitat.

**n**, **m** et **p** représentent le nombre d'éléments des ensembles respectifs.

Un système urbain comprend donc au moins 1 espace public (EP), au moins 1 équipement (E) et au moins 1 groupe d'habitat (GH).

A cours de l'histoire des villes occidentales des espaces publics (EP) étaient souvent couplés à des équipements (E) et des groupes d'habitats (GH) et fonctionnaient comme un centre-ville. Par exemple en face de l'hôtel de ville on trouve régulièrement une place de marché. Selon l'évolution de la société, différentes sortes de centralités voient le jour [Park, 2009].





## **CHAPITRE 3 : ETAT DE L'ART**

*Ce chapitre présente l'état de l'art concernant notre problématique de recherche. Il décrit l'état des connaissances existantes dans le domaine de la modélisation et de la simulation urbaine. On a procédé à une investigation des publications formelles antérieures, mais aussi des informations liées à des nouveautés et inventions dans le domaine des simulateurs urbains. La synthèse donnée en fin de chapitre permettra de mettre en évidence les lacunes de la recherche dans le domaine de la modélisation et de la simulation urbaine par rapport à notre problématique.*

### **3.1 Les systèmes d'information géographique**

Pour concevoir notre prototype de simulation nous nous appuyons sur la technologie SIG. Un SIG est défini comme un outil informatique qui permet de stocker, de traiter et de représenter l'information géographique. L'information est stockée dans une base de données géographique qui peut intégrer des données géométriques et thématiques. Un thème d'information peut-être représenté par une couche représentant un ensemble d'objets de même nature. Cette couche fait le lien entre la représentation géographique des objets spatiaux et la table d'information contenue dans la base de données. L'information peut être représentée par des pixels (mode raster) ou par des points, lignes ou polygones (mode vecteur). Ces deux modes peuvent être combinés [Sanders, 2004]. Toutefois tous les SIG existants ne permettent pas de traiter l'information géographique tel qu'on le souhaiterait (voir à ce sujet la section consacrée à GeOxygene, § 5.1.2).

Un SIG est souvent utilisé pour cartographier des données spatialisées mais il est aussi un outil de modélisation du terrain géographique notamment à travers la structuration de l'information spatiale. Il peut ainsi être vu comme un outil de recherche en géographie [Langlois 2004]. « Le géographe alimente, par ses problématiques complexes sur l'espace, les travaux des « géomaticiens » pour adapter l'outil à ces nouvelles exigences, ouvrant aux géographes de nouvelles possibilités d'investigation de l'espace. » [Langlois 2004]. De nouveaux paradigmes émergent qui visent à l'intégration des SIG et de la simulation géographique [Benenson & Torrens, 2003]. En outre les SIG jouent désormais un rôle important dans l'amélioration du management urbain et des villes.

### **3.2 Etat de la recherche concernant la modélisation de la ville**

Jusqu'à présent le système urbain n'a pas fait l'objet d'une formulation scientifique satisfaisante en raison de sa complexité [Salingaros, 2005]. Les premiers travaux remarquables effectués dans ce sens ont été réalisés par l'architecte Christophe Alexander [Alexander, 1979] [Alexander, 2005]. Plus récemment on trouve des chercheurs tels que Bill Hillier [Hillier, 1999] qui considère que l'évolution de l'espace urbain est régie par une logique et des lois qui déterminent sa croissance. Michael Batty [Batty,

## CHAPITRE 3 : ETAT DE L'ART

### *La simulation urbaine*

1994] s'attache à décrire les formes de la ville en faisant appel à la géométrie fractale alors que Juval Portugali [Portugali, 2000] envisage la ville comme un système auto-organisé.

Dès le milieu des années 80 des auteurs tels que Michael Batty et Paul Longley se sont intéressés à l'application de la théorie fractale au milieu urbain [Batty et Longley, 1996]. Selon [Frankhauser, 1991] les zones urbaines sont structurées selon certains principes d'organisation malgré leur aspect irrégulier. En outre cette organisation est liée à des phénomènes hiérarchiques basés sur un emboîtement d'échelles (de l'immeuble à l'îlot urbain, de l'îlot au quartier, du quartier à la ville, etc.) qui rappelle les structures fractales voire multifractales. Badariotti [Badariotti, 2005] a étudié les dimensions fractales particulières de certains tissus spécifiques tels le centre-ville.

Beaucoup de recherches ont été faites dans le domaine de la fractalité des villes par Michael Batty [Batty, 2005], [Batty et Longley, 1996], [Batty et al, 1993]. Il propose notamment l'utilisation des fractales pour comprendre et planifier la forme physique des villes. L'approche fractale peut nous permettre de décrire des formes complexes de la ville ainsi que de révéler un ordre caché et une organisation. On peut utiliser la géométrie fractale dans les modélisations informatiques et ainsi simuler la texture urbaine, les frontières, les réseaux ainsi que les hiérarchies. Dans [Batty et Longley, 1996] les auteurs mettent en avant la caractéristique d'autosimilarité de la ville à diverses échelles. Des invariants de forme peuvent ainsi être trouvés à plusieurs échelles. Certains auteurs ont noté la présence de niveaux d'organisation multiples, des décisions d'acteurs individuels à celles d'entités collectives qui gouvernent la ville [Reymond, Cauvin et Kleinschmager, 1998]. On peut observer dans la ville 3 types de complexité : une complexité de structure émergeant de l'interaction de nombreux agents individuels, une complexité d'échelle liée à une imbrication d'échelles spatiales ou de niveaux d'organisation différents et une complexité dynamique liée à une évolution difficilement prévisible du système due à une évolution non-linéaire [Dauphiné 2003].

Selon les postulats du chapitre 2 et la revue bibliographique ci-dessus on va considérer dans notre modélisation (chapitre 4) la ville comme une entité présentant des caractéristiques d'organisation multi-échelle.

### **3.3 La simulation urbaine**

On désigne par le terme *simulation* un procédé permettant à l'aide de moyens informatiques de représenter, étudier un phénomène réel et éventuellement à prédire son évolution. Cette simulation repose généralement sur un modèle du phénomène à étudier. Les outils informatiques qui permettent la simulation sont appelés des simulateurs et permettent éventuellement, comme c'est généralement le cas en géosimulation, de visualiser les résultats.

Des simulateurs ont été développés depuis de nombreuses années pour simuler des processus dynamiques, notamment en physique, chimie, biologie, hydrologie, sciences sociales et urbanisme. Nous nous intéressons ici plus particulièrement à la simulation urbaine.

## CHAPITRE 3 : ETAT DE L'ART

### *Environnements de simulation urbaine*

#### **3.3.1 Simulation ludique du développement urbain**

On trouve des jeux vidéo simulant le fonctionnement d'une ville en 3D, tels *SimCity*<sup>7</sup>, *Cesar IV* ou *Glory Of The Roman Empire*. Il est remarquable de noter que dans *Simcity Sociétés* (sorti en 2007) les bâtiments sont en interaction les uns avec les autres avec une notion d'effet positif et négatif : par exemple si trop de bâtiments d'un même type se trouvent à un même emplacement leur influence positive diminue. Les bâtiments sont implantés sur le territoire en fonction de 6 « énergies sociales » : *prospérité, productivité, spiritualité, connaissance, autorité et créativité* qui déterminent l'évolution de la ville. C'est en quelque sorte des lois d'évolution de la ville semblables à celles introduites par nous dans le cadre de notre recherche mais plus « surréalistes ». Malgré tout ces jeux restent éloignés du fonctionnement réel d'une ville.

#### **3.3.2 Simulation de la dynamique urbaine selon des thématiques sociales particulières**

Beaucoup de travaux ont été réalisés dans le domaine de la simulation urbaine, notamment la simulation du trafic routier [El hadouaj et al, 2001], des flux de piétons [Antonini et al, 2006], de la dynamique des populations [Vanbergue et Drogoul, 2002], du marché de l'immobilier [Zimmermann, 2006], [Devish et al, 2006] entre autres.

#### **3.3.3 Simulation de l'expansion urbaine**

En ce qui concerne le développement de la limite physique de la ville en lien avec l'accroissement de la population on peut citer les travaux de Denise Pumain [Pumain et al, 1989].

### **3.4 Environnements de simulation urbaine**

Ainsi que le note [Benenson & Torrens 2004] on a assisté récemment à une transformation de la simulation urbaine qui a débouché sur de nouveaux types de simulateurs influencés par des technologies comme les automates cellulaires (§ 3.7.1) ou les systèmes multi-agents (§ 3.6). Les modèles classiques représentant des flux de population, de biens ou de matières entre des sections de l'espace bien définies ont été progressivement remplacés par des modèles représentant un nombre important d'éléments en interaction. Ces interactions vont du niveau local au niveau global et peuvent être régies par un certain nombre de règles comportementales. Cette nouvelle vague de simulation s'étend à d'autres domaines de recherche tels que l'écologie ou les sciences sociales. Les connaissances actuelles en simulation permettent une traduction de comportements d'éléments d'un système réel en un système virtuel (environnement virtuel de simulation). Les géographes sont appelés à jouer un grand rôle dans ce nouveau type de simulation que l'on a appelé *géosimulation*. La géosimulation considère les systèmes

---

<sup>7</sup> <http://simcitysocieties.ea.com/>

## CHAPITRE 3 : ETAT DE L'ART

### *Environnements de simulation urbaine*

urbains comme un ensemble d'éléments spatiaux : bâtiments, parcelles,...Le résultat de leur interaction peut être des figures ou des phénomènes émergents à différentes échelles.

Il existe différents systèmes de simulation urbaine actuellement en développement :

#### **3.4.1 Gigapolis**

La croissance urbaine est un phénomène incontrôlable et peu gérable dans les zones urbanisées engendrant des conséquences territoriales et environnementales [Cagliani, 2006]. Le projet *Gigapolis* représente la croissance de la structure urbaine contenant des millions de personnes à travers le monde. Le projet prétend que les agglomérations urbaines auront un rôle majeur à jouer au cours du XXIème siècle et que les impacts sur le sol, l'atmosphère et sur les ressources hydrologiques doivent être considérés à une échelle globale. Le projet Gigapolis (né d'une collaboration entre l'*University of California* de Santa Barbara et l'*United States Geological Survey*) étend et affine le modèle de croissance urbaine de Clarke [Clarke & Gaydos, 1998] permettant ainsi des prévisions à un niveau régional, continental et global. Le modèle utilisé est le modèle SLEUTH<sup>8</sup> [Clarke, 1997], [Clarke & Gaydos, 1998], basé sur les automates cellulaires (§ 3.7.1) et est une évolution du *Urban Growth Model*, un automate cellulaire développé en 1998 par Clarke [Clarke & Gaydos, 1998].

#### **3.4.2 OBEUS**

OBEUS (fig.11) est un logiciel de simulation qui permet de modéliser simultanément l'infrastructure de la ville et de ses composants humains. Il intègre les approches par automates cellulaires (§ 3.7.1) et multi-agents (§ 3.6). L'utilisateur peut définir ses propres règles, OBEUS se voulant une plateforme à vocation générique. Les objectifs principaux d'OBEUS sont les suivants [Benenson et al, 2001]:

- Modéliser et simuler simultanément des objets urbains mobiles et immobiles
- Expliquer les relations spatiales entre des objets urbains de tous types
- Fournir des outils pour la représentation et la modélisation de :
  - La création, le changement et la destruction d'objets
  - La migration et l'adaptation d'objets
  - La création et la disparition d'objets spatiaux à des niveaux élevés de la hiérarchie

On trouvera plus d'informations sur OBEUS dans [Benenson et al, 2005], [Benenson et al, 2001].

---

<sup>8</sup> logiciel libre <http://www.ncgia.ucsb.edu/projects/gig/v2/Dnload/download.htm>

## CHAPITRE 3 : ETAT DE L'ART

### Environnements de simulation urbaine

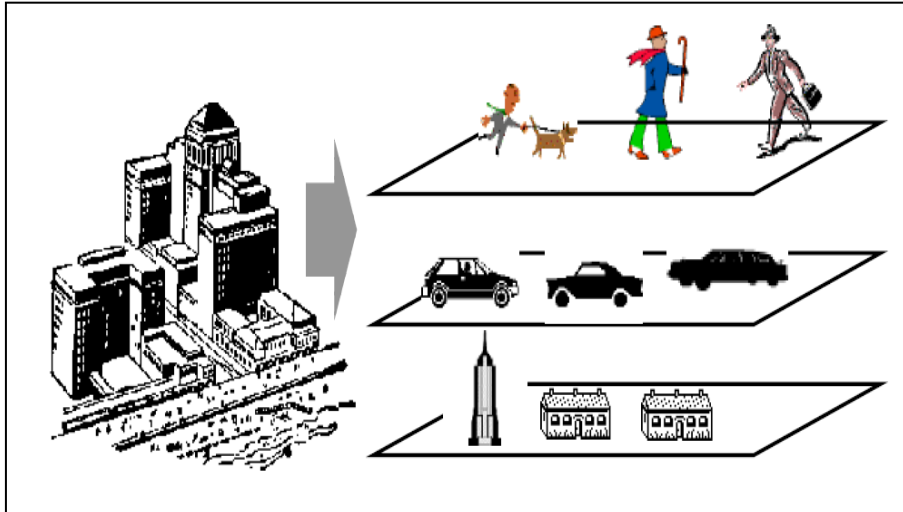


Figure 11: OBEUS, représentation de l'environnement urbain selon différentes couches d'information [Benenson et al, 2001]

### 3.4.3 UrbanSim

UrbanSim [Waddell et al, 2008], [Waddell et Ulfarsson, 2004], [Waddell et al, 2003], [Waddell, 2002] est un logiciel open-source (qui peut être téléchargé à <http://www.urbansim.org/>) de modélisation du développement urbain qui gère les interactions entre l'occupation du sol, les transports et la planification environnementale. Il a été développé par le *Center for Urban Simulation and Policy Analysis* de l'Université de Washington. Il a continuellement évolué depuis sa création à la fin des années 1990. C'est un logiciel réutilisable, dans le sens qu'il peut être appliqué à une nouvelle zone d'étude en y insérant les données appropriées : population, emplois, prévisions économiques, prévisions sur le développement territorial, contraintes environnementales, etc. L'utilisateur peut créer et comparer des scénarios en spécifiant les inputs requis. Les outputs peuvent être des prévisions sur la distribution de la population, l'occupation du sol, la densité de développement, le prix du terrain. UrbanSim est un outil intéressant pour la compréhension du développement d'une région urbaine et notamment pour comprendre comment les différentes combinaisons de l'utilisation du sol et les politiques de transport y contribuent.

### 3.4.4 UrbanLab

UrbanLab [Caneparo et al, 2006] est un logiciel qui simule l'impact de grands programmes et développé au Polytechnico de Torino. Il se base sur les agents cellulaires. Le résultat de la simulation est une visualisation 3D dans laquelle on peut naviguer. Les simulations permettent de modifier le projet en fonction du feedback des personnes consultées. La ville de Turin a par exemple étudié l'impact d'une ligne ferroviaire à construire dans la vallée alpine. Divers scénarios ont été envisagés et présentés aux décideurs(fig. 12).

## CHAPITRE 3 : ETAT DE L'ART

### Approche systémique

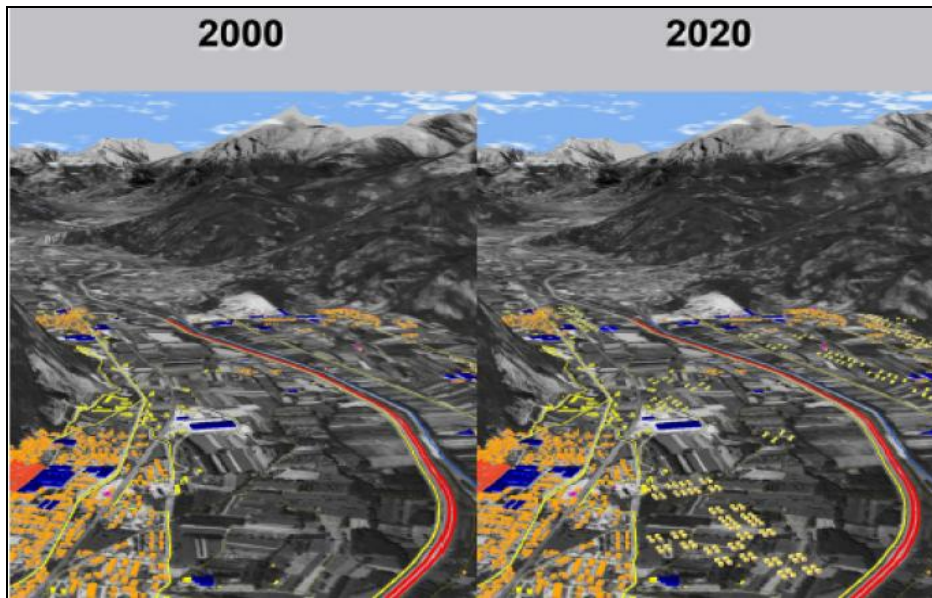


Figure 12: Vues synchronisées d'un scénario de simulation par UrbanLab [Caneparo et al, 2006]

### 3.4.5 Projet aux Pays-Bas

Ce projet [Borsboom et al, 2006] tente de coupler les outputs produits avec un modèle d'utilisation du sol basé sur les agents cellulaires avec un logiciel de visualisation 3D. Le but général du projet est de modéliser l'utilisation du sol aux Pays-Bas en 2030 avec des cartes et une visualisation 3D. Ce type de visualisation 3D peut être utile dans le cadre de la planification spatiale liée à l'écologie et à l'agriculture. En effet la visualisation 2D classique ne révèle pas toujours l'apparence de l'environnement physique (le paysage perçu) après un changement au niveau de l'utilisation du sol. La visualisation 3D peut ainsi permettre d'avoir un aperçu sur le changement de volume de certains objets et sur la compatibilité de ces changements en rapport avec les caractéristiques de l'environnement naturel et construit. Elle peut être ainsi utile au public concerné par les effets territoriaux et écologiques d'un changement de l'utilisation du sol. Les concepteurs du projet mentionnent néanmoins des difficultés dues à la structure raster<sup>9</sup> et aux problèmes de temps de calcul.

## 3.5 Approche systémique

L'approche systémique se base sur une logique des systèmes pour comprendre des phénomènes complexes qui sont difficilement analysables par les démarches analytiques classiques. La théorie a son origine dans les années 60 lorsque Ludwig Von Bertalanffy théorisa le fonctionnement global des systèmes biologiques dans son ouvrage fondateur *General System Theory* [Von Bertalanffy, 1968].

<sup>9</sup> Format raster : Dans un système d'information géographique (SIG) l'information peut être stockée et représentée au niveau du pixel (on est alors en mode raster) ou au niveau d'objets spatiaux tels des points, des lignes ou des polygones (mode vecteur).

## CHAPITRE 3 : ETAT DE L'ART

### *Les systèmes complexes*

La théorie des systèmes postule qu'il existe des lois générales régissant les systèmes complexes. Ces lois sont moins liées à la nature de la matière constituant le système qu'à l'interaction entre ses composants. Certaines lois concernent l'ensemble du système dans sa globalité. Par exemple certaines propriétés émergentes n'ont d'existence qu'au niveau global du système.

Avec l'approche systémique on représente le phénomène que l'on veut étudier sous la forme d'une boîte noire. Cette boîte noire est caractérisée d'une part par un comportement à ses bornes (comportement externe), i.e. les réactions observables du système depuis l'extérieur de celui-ci et d'autre part par une structure interne (état interne), i.e. sa dynamique interne.

Dans le cadre de notre recherche la ville peut être vue comme un système dynamique composé d'objets en interaction, possédant une structure interne ainsi qu'un comportement externe. On connaît le comportement mais non le fonctionnement de cette boîte noire. Selon l'approche systémique, connaissant les informations entrant dans la boîte noire et les réactions on va pouvoir décrire le système représenté [Michel 2004].

### **3.6 Les systèmes complexes**

Dans le cadre de la recherche on considère la ville comme un système complexe. Ci-dessous on présente les principales notions théoriques concernant les systèmes complexes et leur usage dans notre modélisation de la ville.

Un système complexe est un système composé d'éléments en interaction et qui montrent des propriétés au niveau global qui ne se déduisent pas de façon simple (par des équations par exemple) des propriétés des parties individuelles. Un système complexe peut montrer des propriétés émergentes et de l'auto-organisation. Diverses disciplines scientifiques s'intéressent aux systèmes complexes : les sciences naturelles, les mathématiques et les sciences humaines. Plusieurs chercheurs se sont consacrés à l'étude des systèmes complexes [Von Bertalanffy, 1968], [Le Moigne, 1977], [Morin, 1977]. Il existe plusieurs sortes de systèmes complexes. Ceux qui nous intéressent ici sont les *Complex Adaptive Systems* (CAS). Ils sont composés de multiples éléments interconnectés et capables d'évolution. On peut citer parmi ces systèmes les colonies de fourmis, les écosystèmes et les sociétés humaines.

La démarche analytique traditionnelle ne parvient pas à expliquer de manière satisfaisante les systèmes complexes. Certains phénomènes complexes ne sont pas décomposables sans perte d'information. On a coutume de dire que le « tout n'est pas la somme des parties ». Dans ces systèmes la causalité linéaire traditionnelle n'explique pas efficacement les phénomènes. On accorde beaucoup d'importance aux interactions entre les constituants du système pour expliquer son comportement.

Pour comprendre les systèmes complexes on essaye de les simuler sur ordinateur. On tente de reproduire de la manière la plus fidèle possible le comportement du système. Pour assurer le succès

## **CHAPITRE 3 : ETAT DE L'ART**

### *Les systèmes multi-agents*

d'une innovation, par exemple, dans le système urbain, il est nécessaire d'utiliser la théorie des systèmes complexes sinon elle peut être rendue inefficace due à une mauvaise organisation.

La théorie urbaine fait appel à des disciplines comme l'architecture, l'ingénierie, l'économie, l'histoire, la géographie, l'écologie et la sociologie. Pour mieux comprendre et maîtriser la métropole d'aujourd'hui il faut développer un outil basé sur les systèmes complexes qui intègre ces compétences interdisciplinaires.

## **3.7 Les systèmes multi-agents**

### **3.7.1 Intelligence artificielle**

L'intelligence artificielle (IA) est définie comme étant l'intelligence des machines et la branche des sciences informatiques qui tente de la recréer [Turing, 1950], [McCarthy & Hayes, 1969], [Minski, 1988]. La littérature associée définit l'intelligence artificielle comme étant « l'étude et la conception d'agents intelligents », et où un agent est un système qui perçoit son environnement et prend des actions qui maximisent ses chances de succès.

### **3.7.2 Intelligence artificielle distribuée**

L'intelligence artificielle distribuée (IAD) est un sous-domaine de l'intelligence artificielle qui traite des solutions distribuées à des problèmes complexes. Les principaux champs de recherche de l'IAD sont la résolution distribuée de problèmes et la simulation basée sur les systèmes multi-agents dont les principales notions sont présentées au prochain paragraphe. Il y a de nombreuses raisons de vouloir distribuer l'intelligence. Dans certains domaines les activités sont spatialement distribuées, comme par exemple dans le trafic aérien ou les commerces dans un milieu urbain. D'autres raisons de vouloir répartir l'intelligence entre plusieurs entités incluent l'adaptabilité, la réduction des coûts ou l'augmentation de l'efficacité d'un système.

### **3.7.3 Définition d'un agent**

Dans le milieu de la recherche en intelligence artificielle il reste difficile de donner une définition précise et partagée par la communauté des chercheurs du concept d'*agent*. Cela reste un sujet de controverse [Wooldridge et al, 1998], [Wooldridge et Jennings, 1995].

Néanmoins on peut citer différentes définitions des systèmes multi-agents données par certains chercheurs dans le domaine :

*"An agent is anything that can be viewed as perceiving its environment through sensors and acting upon that environment through effectors"* [Russell and Norvig, 1995].



## CHAPITRE 3 : ETAT DE L'ART

### Les systèmes multi-agents

*“Intelligent agents continuously perform three functions: perception of dynamic conditions in the environment; action to affect conditions in the environment; and reasoning to interpret perceptions, solve problems, draw interfaces and determine actions” [Hayes-Roth, 1995].*

*“An intelligent agent is generally regarded as an autonomous decision-making system, which senses and acts in some environment” [Wooldridge et al, 1998].*

On retiendra particulièrement celle de Wooldridge [Wooldridge & Jennings, 1995] qui considère un agent comme une entité possédant les caractéristiques suivantes :

- *Autonomie* : un agent prend des décisions sans intervention extérieure (humaine ou autre) et a un contrôle sur ses actions et son état interne.
- *Sociabilité* : un agent interagit avec les autres agents (pouvant être des humains) par l'intermédiaire d'un langage de communication.
- *Réactivité* : un agent perçoit son environnement (qui peut être par exemple le monde physique) et est capable de répondre aux changements de cet environnement dans un intervalle de temps donné.
- *Pro-activité* : un agent ne réagit pas simplement en réponse aux changements dans l'environnement, il est aussi capable de montrer un comportement orienté vers la réalisation d'un objectif et de prendre l'initiative.

Cette définition peut être étendue et on peut dire qu'un agent peut posséder des compétences, offrir des services et se reproduire. « L'agent est ainsi une sorte *d'organisme vivant* dont le comportement, qui se résume à communiquer, à agir et, éventuellement, à se reproduire vise à la satisfaction de ses besoins et de ses objectifs à partir de tous les autres éléments (perceptions, représentations, actions, communications et ressources) dont il dispose » [Ferber, 1995].

Il faut remarquer que le terme *agent* peut revêtir plusieurs significations selon que l'on se réfère au domaine de l'intelligence artificielle ou à celui de la conception logicielle. Dans le domaine de l'intelligence artificielle il s'agit d'un concept abstrait plus ou moins bien défini. La conception logicielle reprend le sens de base de l'IA mais l'enrichit ou l'élargit. Il n'est ainsi pas rare de parler d'agent dans un système logiciel alors que le système lui-même semble avoir peu de choses en commun avec la définition première. Le terme *agent* est aujourd'hui plus utilisé comme référence à un paradigme de conception logicielle plutôt qu'à un concept abstrait de l'IA. Un thème qui semble récurrent dans la définition du terme *agent* est l'interaction (ou communication) entre les agents. Quand on parle de systèmes multi-agents on a toujours à faire à un système d'entités distribuées qui interagissent [Labrou, 2000].

### 3.7.4 Architecture interne d'un agent

Un agent peut aussi être vu comme un système possédant des entrées et des sorties [Wooldridge, 2001]. Un agent possède aussi une architecture interne, c'est-à-dire tout un ensemble de mécanismes qui lui

## CHAPITRE 3 : ETAT DE L'ART

### Les systèmes multi-agents

sont propres qui lui permettent de percevoir et d'agir en conséquence. Selon Ferber [Ferber, 2000] un agent possède trois processus que sont la perception, la délibération et l'action (fig. 13).

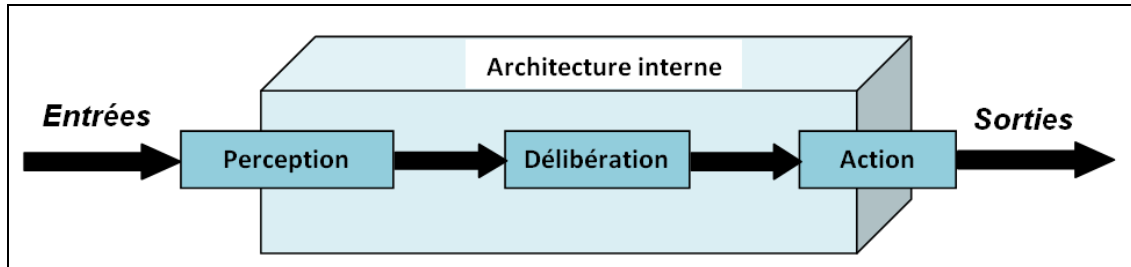


Figure 13: Architecture interne d'un agent avec les processus de Perception, Délibération et Action

Le comportement d'un agent ne dépend ainsi pas seulement des paramètres de l'environnement dans lequel il se trouve mais aussi de ses caractéristiques internes. Contrairement aux objets de l'environnement il ne fait pas que réagir aux variations de l'environnement mais il est capable de prendre de décisions (délibération) suivant un ensemble de règles comportementales bien définies. Le processus de délibération d'un agent est la partie fondamentale d'un agent, c'est en fonction de lui que l'agent prend telle ou telle décision. L'architecture d'un agent peut être de différentes natures, on distingue habituellement l'architecture cognitive de l'architecture réactive qui sont décrites ci-dessous.

#### a) Architecture cognitive

Un agent cognitif (possédant une architecture cognitive) est un agent qui est capable de prendre des décisions en fonction d'un objectif donné. L'architecture cognitive la plus connue est l'architecture BDI (*Belief Desire Intention*) [Rao & Geogeff 1995]. Les *croyances* sont ce que l'agent connaît de son environnement, les *désirs* sont les états possibles que l'agent peut atteindre et les *intentions* sont les projets qu'il a l'intention de mener à bien. Ainsi un agent possédant une architecture BDI met à jour ses croyances en fonction de ses perceptions, décide ce qu'il peut atteindre et réalise ses actions selon ses intentions. L'architecture que nous avons choisie pour implémenter nos agents est une architecture cognitive (cf. chap.5).

#### b) Architecture réactive

A l'inverse des agents cognitifs les agents réactifs (possédant une architecture réactive) se contentent de réagir aux stimuli. Ils n'ont pas d'objectifs définis mais cela ne signifie pas qu'ils ne se comportent pas de manière intelligente. Le cas le plus parlant est celui des fourmis qui accomplissent une tâche de manière mécanique sans avoir en « tête » un objectif précis. Cela signifie également que l'on peut construire des agents dotés d'une architecture réactive pour résoudre des tâches très complexes. L'intelligence émerge de l'interaction entre des composantes simples, et entre les agents réactifs et l'environnement.

La plus connue des architectures réactives est l'architecture de subsomption [Brooks & Connell, 1992]. Ce type d'architecture comporte plusieurs modules (dits modules de compétence) et chacun d'eux est responsable de réaliser une tâche simple. Les modules sont organisés de façon hiérarchique.

## CHAPITRE 3 : ETAT DE L'ART

### *Les systèmes multi-agents*

Cette approche a été développée due à la difficulté de trouver un bon modèle cognitif pour certaines applications des systèmes multi-agents.

#### **3.7.5 Définition d'un SMA**

Un système multi-agents (SMA) est un système composé de multiples agents en interaction dans un environnement. Ces agents sont dotés d'intelligence et d'autonomie et peuvent être utilisés pour résoudre des problèmes qui sont difficiles ou impossibles à résoudre par des systèmes possédant une intelligence centralisée [Ferber, 1997].

Les approches classiques basées sur des équations différentielles et les principes de cause à effet ne permettent pas de modéliser les systèmes complexes de manière satisfaisante, notamment en ce qui concerne les aspects qualitatifs comme par exemple des comportements stratégiques face à un problème donné [Wooldridge, 2009].

Les systèmes multi-agents sont par exemple utilisés pour modéliser des organisations sociales complexes comme certaines familles d'insectes. L'exemple classique est celui des sociétés de fourmis. Cette forme d'intelligence artificielle est appelée *Swarm intelligence (SI)* [Beni & Wang, 1989]. Une intelligence collective émerge de l'interaction entre des entités simples. Le terme est utilisé pour nommer une modélisation pour la résolution distribuée de problèmes qui s'inspire du comportement d'organismes sociaux. Cette approche de modélisation se base sur le fait qu'on peut résoudre certains problèmes selon une autre voie que par les méthodes traditionnelles. Les agents dans un système multi-agents interagissent et de façon non intentionnelle peuvent résoudre un problème. Par exemple dans une colonie de fourmis un individu peut agir en fonction du bien-être de la colonie mais sans aucune information concernant l'état de la colonie. Il n'y a donc pas d'instance supérieure qui dirige les activités en vue d'un objectif commun. Ce type d'organisation peut être qualifiée d'émergente [Beni & Wang, 1989].

Les principaux éléments d'un SMA sont [Jennings, 2000]:

- Les agents
- Les interactions
- Les relations d'organisation

Un SMA peut ainsi être représenté selon la fig.14.

### CHAPITRE 3 : ETAT DE L'ART

#### Les systèmes multi-agents

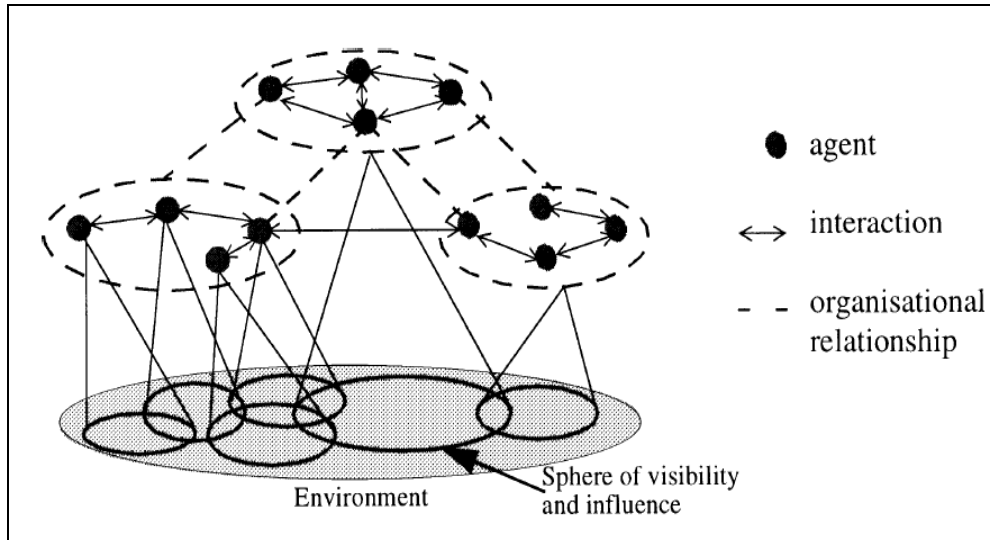


Figure 14: Vue canonique d'un SMA [Jennings, 2000]

Plus formellement pour un SMA on peut donner la définition de Ferber largement adoptée [Ferber, 2000] cité par [Frank 2001] :

Un « système multi-agents » est un système composé des différentes parties suivantes (fig.15):

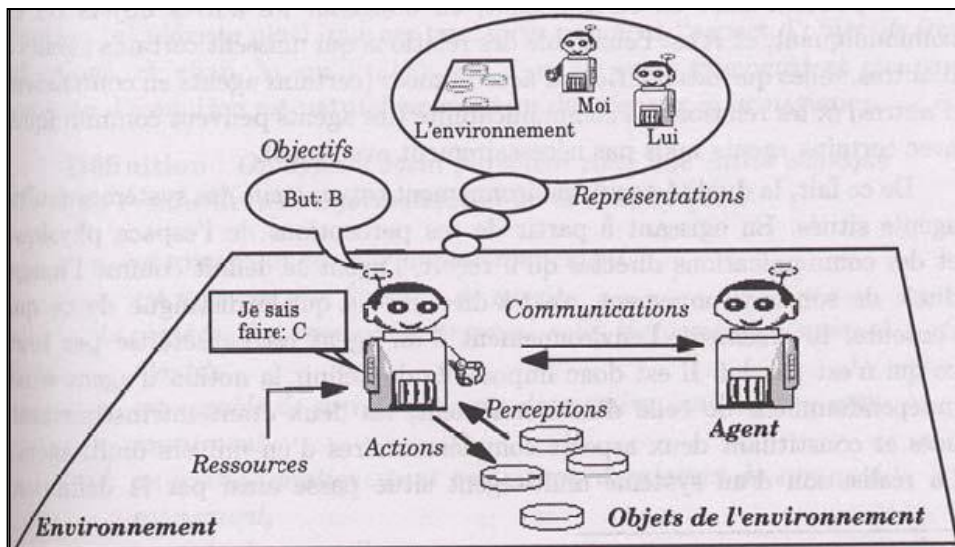


Figure 15: Représentation imagée d'un agent en interaction avec son environnement [Ferber, 1997]

- Un *environnement*  $E$  composé des éléments suivants :
  - Un ensemble d'*objets*  $O$ . Ces objets peuvent être perçus, créés, détruits et modifiés par les agents.
  - Un ensemble d'*agents*  $A$ . Les agents sont un sous ensemble d'objets ( $A$  inclus dans  $O$ ) capables de réaliser des actions. Ce sont les entités actives du système.
  - Un ensemble de positions  $P$  déterminant les positions possibles des objets (de l'ensemble  $O$ ) dans l'espace.

## CHAPITRE 3 : ETAT DE L'ART

### *Les systèmes multi-agents*

- Un ensemble de *relations*  $R$  qui relie les objets et aussi les agents entre eux.

Les systèmes multi-agents sont un paradigme émergent pour la simulation d'entités autonomes en interaction [Weiss, 1999]. En général un système est appelé un système multi-agents s'il contient au moins un agent qui perçoit un environnement simulé à travers des capteurs et dont les actions influencent l'environnement et qui est influencé en retour par sa perception de l'environnement [Frank et al, 2000].

### 3.7.6 Applications des SMA

La technologie agent est de plus en plus utilisée pour résoudre des problèmes concrets. Notamment les SMA trouvent des applications dans les domaines tels que :

#### **Robotique :**

Dans le domaine de la robotique mobile collective (RMC), les systèmes multi-agents servent surtout à analyser des algorithmes comportementaux avant leur implémentation dans des robots réels, et cela pour des raisons de coût. On trouve des applications dans l'étude de robots fourrageurs [Simonin, 2001], des robots footballeurs [Magnin, 1996] ou encore des robots détecteurs d'odeurs [Martinoli et al, 2007].

#### **Ecologie et sciences sociales :**

On trouve des applications des systèmes multi-agents dans le domaine de l'écologie et notamment dans la gestion des ressources renouvelables [Bousquet et al, 1998] ou encore la modélisation des systèmes complexes naturels [Courdier et al, 1998]. Dans le domaine des sciences sociales on trouve des applications en simulation urbaine [Vanbergue et Drogoul, 2000], en dynamique du changement d'opinion dans une population [Deffuant et al, 2002].

On trouve encore d'autres applications des SMA dans les domaines suivants [Wooldridge et Jennings, 1998]:

- **Contrôle du trafic aérien** : les avions sont représentés par des agents qui peuvent par exemple réaliser des plans de vol qui puissent maintenir une distance de sécurité entre les avions et satisfaire d'autres contraintes [Cammarata, 1983].
- **Télécommunications** : les systèmes de communication sont des systèmes étendus et composés de réseaux interconnectés qui ont besoin d'être gérés en temps réel. Des agents négociants peuvent par exemple être utilisés pour gérer des appels [Griffeth, 1994].
- **Transports** : le domaine des transports est un domaine qui se prête bien à la simulation multi-agents étant donné leur caractère distribué dans l'espace géographique. Des applications dans ce domaine sont décrites par [Fischer et al. 1996].

## CHAPITRE 3 : ETAT DE L'ART

### *Les systèmes multi-agents*

- **Gestion de satellites** : des agents peuvent être utilisés pour permettre à des satellites de remplir des missions complexes [Schetter et al, 2002].

Il est intéressant de rapporter les remarques de Jennings dans [Jennings, 1998]. On trouve des applications des systèmes multi-agents dans l'univers des jeux vidéo et de la médecine. Ces différentes applications démontrent l'utilité des systèmes multi-agents. Néanmoins la mise en place d'un système multi-agents reste difficile car il existe des obstacles techniques tels que l'absence de méthodologie systématique permettant de structurer les applications développées ou l'absence d'outils de développement de systèmes multi-agents performants [Jennings 1998]. Souvent les systèmes sont développés selon une méthodologie ad-hoc ou en empruntant une méthodologie déjà existante (par exemple une méthodologie orientée objets) et en essayant de s'insérer dans le contexte de la simulation multi-agents ou encore en travaillant sans méthodologie et en modélisant le système en se basant sur l'intuition et l'expérience.

### **3.7.7 Plateformes de simulation multi-agents**

La conception d'un système multi-agents est souvent difficile, notamment en ce qui concerne son implémentation et l'interaction entre les agents. De nombreux paradigmes de conception en sont restés au stade conceptuel sans déboucher nécessairement sur des outils permettant de les mettre en œuvre et les valider. Néanmoins certains systèmes de conception génériques ont été développés.

Parmi les nombreuses plateformes de conception multi-agents existantes, on peut citer :

- DIMA (Développement et Implémentation de systèmes Multi-Agents) [Guessoum, 1996] :
  - développement initié en 1993,
  - codée en Java : briques de base pour construire des modèles d'agents
  - implémente différentes approches conceptuelles des SMA (BDI, KQML, etc.)
  - utilisée en simulation économique et écosystèmes.
- GEAMAS [Marcenac et Giroux, 1998]:
  - Noyau générique avec extensions spécialisées. Le modèle des agents est générique : les agents perçoivent le monde à travers des capteurs et agissent sur le monde au travers d'effecteurs.
- Ou encore MADKIT [Ferber, Gutknecht, Michel, 2000], MASK, JADE, etc.

Souvent ces plateformes offrent une structure d'agent unique (BDI la plupart du temps) et sont de ce fait trop génériques. En outre ce sont souvent des plateformes de recherche donc la documentation peut être difficile d'accès. Leur prise en main nécessite également un investissement de temps important. Finalement elles n'intègrent généralement pas des bibliothèques de traitements géomatiques et leur développement n'est pas orienté SIG. Pour toutes ces raisons elles ne semblent pas être adéquates pour notre recherche et nous donc avons choisi de ne pas les utiliser.

## CHAPITRE 3 : ETAT DE L'ART

### Synthèse

## 3.8 Approches de modélisation et de simulation urbaine

Diverses approches pour modéliser et simuler la dynamique urbaine ont été développées ces dernières années. On peut citer les automates cellulaires divisant l'espace en grilles régulières ou encore les agents cellulaires. Ces systèmes sont présentés ci-dessous.

### 3.8.1 Automates cellulaires

Un automate cellulaire (AC) est une grille régulière composée de cellules, chacune d'elles pouvant se trouver dans un nombre fini d'états discrets à des pas de temps discrets au cours de son évolution. L'état des cellules représentent habituellement l'utilisation ou la couverture du sol. La dynamique du système est déterminée par un certain nombre de règles qui font dépendre l'état d'une cellule à un temps  $t+1$  de l'état au temps  $t$  des cellules de son voisinage. A chaque unité de temps les mêmes règles sont appliquées simultanément à toutes les cellules de la grille [O'Sullivan & Torrens, 2000]. La définition d'un automate cellulaire est relativement simple mais le résultat de son comportement peut être très complexe.

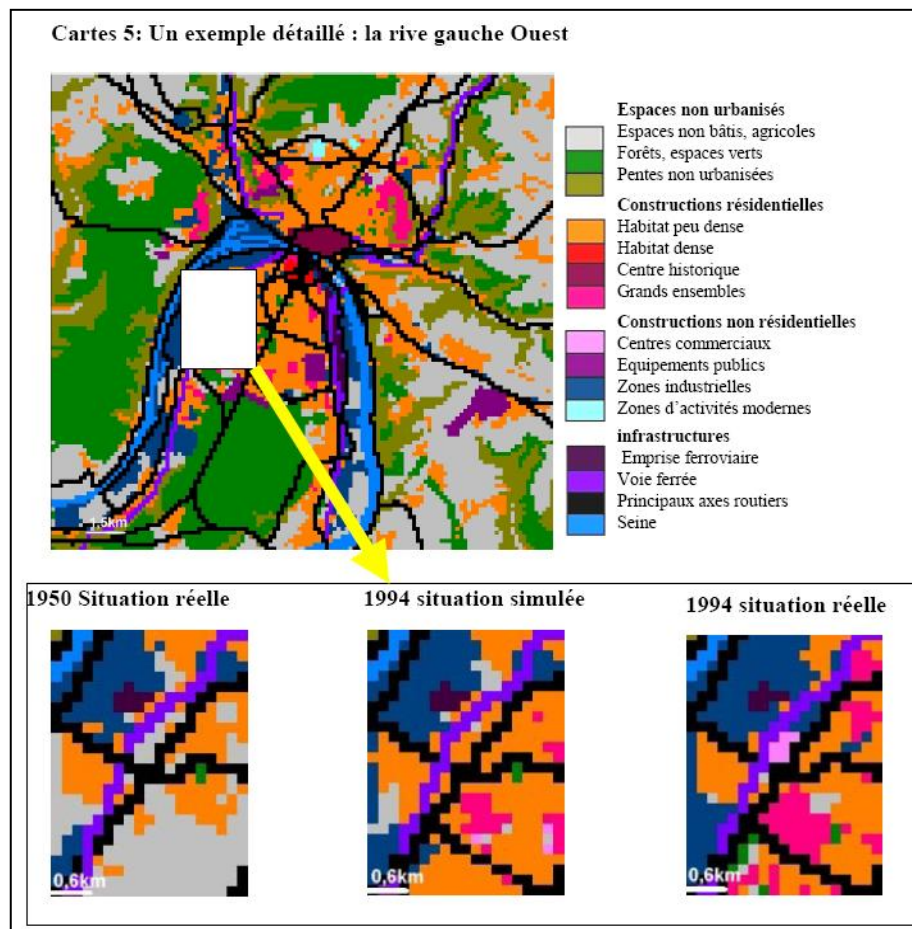


Figure 16: Evolution de l'espace urbain rouennais entre 1950 et 1994 avec le logiciel SpaCell [Langlois et al, 2003]

## CHAPITRE 3 : ETAT DE L'ART

### Synthèse

Les automates cellulaires sont ainsi utilisés dans l'étude des systèmes complexes. Les AC peuvent simuler l'émergence de structures globales à partir d'évènements locaux et peuvent à ce titre être très utiles en simulation urbaine (fig. 16) où beaucoup de phénomènes émergent d'interactions locales [O'Sullivan & Torrens, 2000].

L'approche par automates cellulaires en géographie se base sur le modèle raster qui est une représentation de l'espace par un ensemble de cellules selon un maillage défini.

Les automates cellulaires ont été très utilisés pour simuler l'occupation du sol [White et Engelen, 1993], [Cecchini, 1996]. L'approche par automates cellulaires a rencontré un vif succès en simulation urbaine. Notamment en modélisation de la structure et du développement urbains à l'échelle régionale [Semboloni, 1997], [White & Engelen, 1997], de l'évolution de la forme urbaine [Wu & Webster, 1998], de la croissance urbaine [Batty, 1998]. Les AC sont un outil intéressant pour la simulation urbaine : ils permettent la modélisation de la complexité, ils sont flexibles, leurs résultats peuvent être facilement visualisés, ils ont une certaine affinité avec les SIG due à leur nature « raster » et sont des outils relativement simples [O'Sullivan & Torrens, 2000]. Néanmoins ils ont été critiqués par leur faible correspondance avec la théorie spatiale et urbaine et leur peu d'attention portée aux détails [O'Sullivan & Torrens, 2000]. Selon certains auteurs les AC ne sont pas adaptés à la simulation urbaine :

*"...the basic CA formalism is not well suited to urban applications; the framework is too simplified and constrained to represent real cities. Indeed, radical modification is necessary before CA can approximate even a crude representation of an urban system. This often necessitates the introduction of additional components to add functionality to the basic CA framework..."* ([O'Sullivan & Torrens, 2000] cité par [Hammam et al. 2003]).

Ainsi la complexité urbaine dépasse la capacité des AC classiques. Les systèmes urbains intègrent une grande variété d'objets spatiaux qui interagissent entre eux de manière complexe, non-linéaire et parfois surprenante [Hammam et al. 2003]. Des travaux liés à la simulation urbaine ont ainsi été réalisés avec des automates cellulaires optimisés, d'autres avec des AC contraints [Engelen et al, 1997] (définis avec un large voisinage et un grand nombre d'états), [Li et Yeh, 2000] (avec des contraintes locales, régionales et globales).

D'autres auteurs ont considéré qu'il fallait recourir à d'autres approches que les AC pour modéliser la dynamique urbaine et notamment aux agents cellulaires [Jiang et Gimblett, 2002] définis au paragraphe suivant.

### 3.8.2 Agents cellulaires

Les automates cellulaires peuvent être utilisés pour modéliser l'interaction d'agents dans l'espace. On appelle ce type d'automate un *agent cellulaire*. C'est une approche basée sur les systèmes multi-agents. Un agent cellulaire a un objectif à remplir comportant des caractéristiques spatiales. Il est capable d'accéder et de gérer l'information spatiale afin de résoudre les tâches appropriées [Rodrigues & Raper, 1999]. Les agents cellulaires occupent des positions dans une grille de cellules à deux dimensions et les distances entre elles influencent leurs interactions [Berger, 2001].



## CHAPITRE 3 : ETAT DE L'ART

### Synthèse

Divers travaux intégrant l'approche par agents cellulaires ont été réalisés ces dernières années : [Arentze et al, 2006], [Batty, 2005], [Batty et Jiang, 1999], [Benenson et Thorrens, 2004], [Caneparo et al, 2006], [Devisch et al, 2006], [Vanbergue et Drogoul, 2002], [Waddell et Ulfarsson, 2004], [Zimmermann, 2006]. Certaines de ces recherches intègrent les agents cellulaires avec les SIG en tant que systèmes d'aide à la décision [Rodrigues et al, 1998]. Néanmoins certains de ces travaux ont montré les limites des agents cellulaires pour modéliser les systèmes complexes dynamiques [Hammam et al. 2003]. En effet comme les automates cellulaires, les agents cellulaires sont limités par la forme des cellules qui ne permet pas de bien modéliser des objets irréguliers de l'espace et les relations de voisinage. De plus les processus spatiaux s'effectuent dans un espace continu que les agents cellulaires ne peuvent pas bien modéliser de par leur nature discrète [Hammam et al, 2003]. C'est ainsi que des chercheurs ont proposé une approche par multi-agents basés vecteur pour modéliser des systèmes géographiques complexes.

### 3.8.3 Agents vecteur

Un système multi-agents à composante spatiale peut intégrer une modélisation vectorielle de l'espace. Dans ce cas chaque agent spatial n'a pas de limite de forme et de taille. On appelle ce type d'agent un *agent vecteur*. Les agents vecteur (AV) permettent une modélisation plus réaliste de l'espace géographique que les automates cellulaires ou les agents cellulaires.

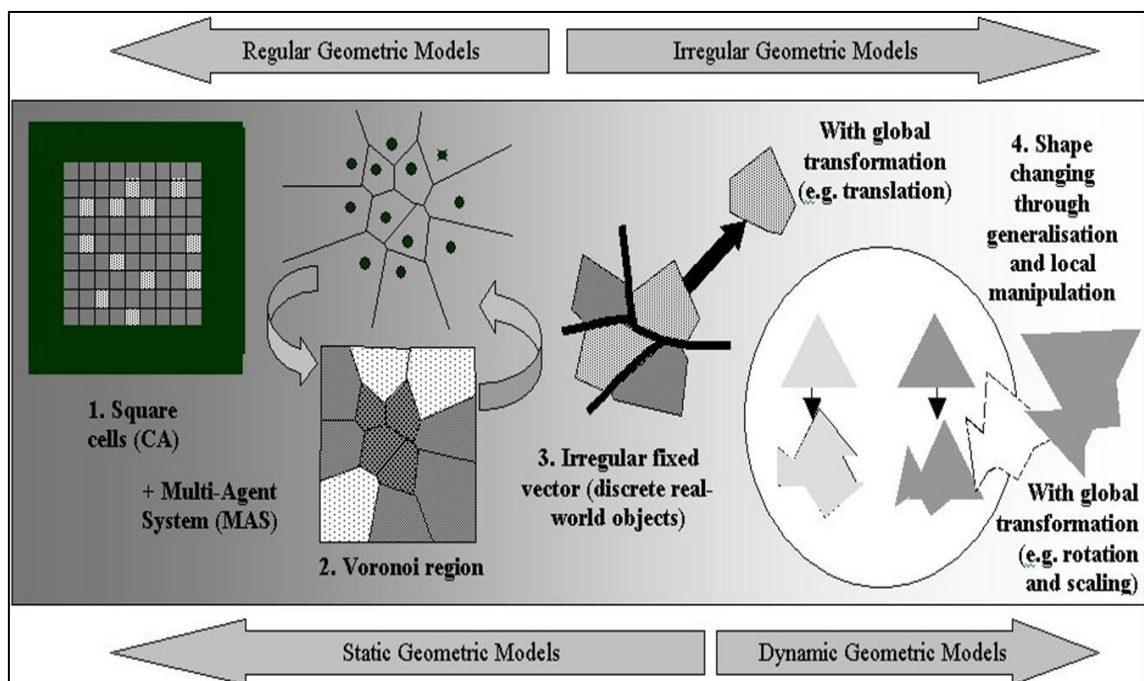


Figure 17: La géométrie dynamique des agents vecteurs géographiques [Hammam et al, 2007]

Ces derniers discrétisent l'espace géographique en plusieurs cellules alors que les AV peuvent représenter une entité spatiale bien déterminée (fig.17) [Hammam et al, 2003]. En outre les AV peuvent posséder un nombre infini de voisins sans limites de distance [Hammam et al, 2003]. Dans le cas des AC les fonctions de transition doivent être appliquées seulement aux voisins immédiats (en principe 8 cellules), ainsi une cellule ne peut pas être affectée par des voisins se trouvant à une plus grande

## CHAPITRE 3 : ETAT DE L'ART

### *Synthèse*

distance. Cette technique de simulation par AV peut être une bonne approche pour reproduire les théories urbaines classiques, chaque classe d'objets spatiaux possédant ses propres règles de transition et ses relations de voisinage qui peuvent être définies de plusieurs manières en fonction du monde réel. Les AV offrent la possibilité de modifier la forme géométrique par une simple altération de paramètres [Hammam et al, 2007]. Finalement les AV permettent de représenter de manière réaliste la complexité de l'espace géographique et de simuler l'interaction des objets se trouvant dans cet espace.

Peu de travaux à ce jour se fondent sur l'approche multi-agent vecteur. On peut citer ceux de l'IGN (Institut Géographique National français) parmi les plus remarquables dans le domaine de la généralisation cartographique automatique [Lamy et al, 1999], [Ruas, 2000], [Duchêne et al, 2001]. Dans [Duchêne et Regnaud, 2002] les chercheurs ont développé un prototype dans lequel les objets cartographiques deviennent des « agents cartographiques » disposant de méthodes pour gérer des conflits cartographiques par exemple. Les agents sont soumis à un certain nombre de contraintes qu'ils doivent satisfaire au mieux et sont souvent en conflit avec les autres agents. Le prototype a été testé sur des données urbaines (sur des bâtiments notamment) et rurales et son utilisation a été adoptée par deux agences cartographiques. Il intègre différents niveaux d'analyse : le niveau *micro*, qui est le niveau le plus bas et correspond aux objets individuels et niveau *méso* qui est celui des groupes d'objet organisés. Les auteurs ont notamment défini trois niveaux d'abstraction pour le milieu urbain : la ville, les îlots urbains (ensemble de bâtiments délimités par des rues), eux-mêmes composés de bâtiments. Les agents *méso* sont la ville et les îlots urbains et les bâtiments sont des agents *micro*. On voit que l'intérêt d'utiliser les systèmes multi-agents vecteur réside aussi dans leur capacité à gérer différents modèles d'individus, d'entités simples à des entités plus complexes. Les concepteurs peuvent ainsi gérer différents niveaux de représentation (des individus aux groupes d'individus), ce qui est difficilement réalisable par exemple avec des automates cellulaires [Drogoul et al, 2003].

### 3.10 Synthèse

La plupart des approches de simulation urbaine décrites ci-dessus ne permettent pas de répondre de manière satisfaisante à nos objectifs de recherche précédemment formulés, à l'exception de l'approche par agents vecteur. Néanmoins les approches de modélisation par agents vecteur décrites ci-dessus sont très spécifiques aux problèmes à résoudre. Il existe en effet peu de travaux dans ce domaine qui permettraient d'avoir des méthodes génériques de conception.

### CHAPITRE 3 : ETAT DE L'ART

#### *Synthèse*

D'après la revue de la littérature consacrée à la modélisation et à la simulation urbaine, on a déterminé que l'approche qui est le plus à même de répondre à notre problématique de recherche est une approche par *agents vecteurs multi-échelles*.

Le choix de l'approche vecteur se justifie par le fait que l'on a recours, dans notre modélisation du système urbain, aux méthodes de l'analyse spatiale, qui comprennent notamment la mise en évidence de structures et de formes d'organisation spatiale récurrentes, qu'illustrent les modèles d'interaction de type gravitaire, les structures urbaines hiérarchisées, les réseaux, etc. [Pumain, 2004]. Les agents vecteurs vont ainsi nous permettre d'analyser les processus qui sont à l'origine de ces structures, au moyen de concepts tels la distance, l'interaction spatiale, etc. Un certain nombre de lois décrivent ces formes et ces processus et font partie des modèles du fonctionnement et de l'évolution des systèmes spatiaux [Pumain, 2004].

Le choix de l'approche multi-échelles se justifie par le fait que les théories de l'auto-organisation ont montré l'intérêt d'observer les interactions qui se produisent à plusieurs niveaux dans le système urbain. En outre l'émergence de structures à certaines échelles rend pertinente la prise en compte de plusieurs niveaux d'observation [Pumain, 2004].

Les systèmes multi-agents nous offrent la possibilité de simuler l'interaction entre les objets constituant la ville et cela à plusieurs échelles, au niveau micro (bâtiments, etc.), méso (groupes de bâtiments et quartiers) et macro (la ville elle-même). Les SMA nous permettent aussi par la définition de règles comportementales simples des agents de produire des comportements complexes. Les SMA peuvent ainsi nous permettre de vérifier certaines hypothèses portant sur le fonctionnement du système urbain et notamment celle qui postule la capacité d'organisation dynamique du programme architectural.

L'approche par *agents vecteurs multi-échelles* est une approche novatrice en ce qui concerne la simulation de la morphogenèse urbaine car, à notre connaissance, à ce jour aucune méthodologie ne s'est basée sur ce principe.



## CHAPITRE 4 : MODELISATION MULTI-AGENTS DU SYSTEME URBAIN

Ce chapitre présente les principaux concepts de la simulation informatique sur lesquels se base notre simulateur. Nous présentons aussi la modélisation multi-échelle du système urbain. Le « Degré de Satisfaction » des agents est également présenté ainsi que la localisation des bâtiments dans l'espace géographique.

### 4.1 La simulation informatique

Avant de présenter notre modélisation du système urbain, il convient de poser le cadre plus général de la simulation informatique dans lequel cette modélisation s'insère.

#### 4.1.1 Définition

La simulation informatique est un outil permettant de représenter des phénomènes réels ou virtuels. Elle est définie par [Shannon, 1998] comme « le processus de conception d'un modèle et la conduite d'expérimentations avec ce même modèle dans le but de comprendre le comportement du système et/ou d'évaluer diverses stratégies pour la conduite de ce système ». Un *modèle* est défini comme « une représentation d'un groupe d'objets ou d'idées sous une forme différente de l'entité elle-même » et un système comme « un groupe ou une collection d'éléments liés en interaction » [Shannon, 1998].

On peut encore mentionner la définition que donne Fishwick par la fig.18 extraite de [Fishwick, 1997] :

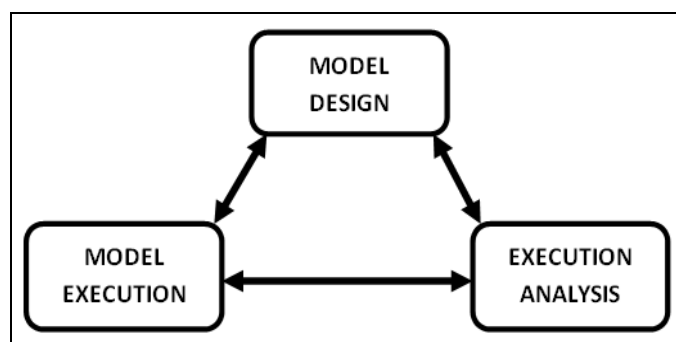


Figure 18: Etapes de conception d'une simulation

La simulation est vue comme un processus itératif à trois composantes (fig.15) : elle consiste à élaborer un modèle d'un système (*Model Design*), à l'exécuter sur ordinateur (*Model Execution*) et à analyser l'output (*Execution Analysis*). Comme la définition de Shannon, cette définition fait apparaître l'importance du modèle dans la conception d'une simulation.

## CHAPITRE 4 : MODELISATION MULTI-AGENTS DU SYSTÈME URBAIN

### *Modélisation du système urbain*

#### **4.1.2 Avantages et inconvénients**

La simulation informatique est un outil puissant qui permet de simuler des processus et des systèmes complexes notamment en sciences naturelles et humaines. Elle rend possible l'étude, l'analyse et l'évaluation de situations qui autrement ne seraient pas possibles. Le but d'une simulation est généralement d'aider le décideur à résoudre un problème. C'est devenu un outil indispensable pour les ingénieurs. La simulation informatique a une série d'avantages sur les modèles analytiques ou mathématiques dans l'analyse des systèmes. Elle se base en effet sur des concepts faciles à comprendre et donc plus faciles à justifier auprès des utilisateurs que certains modèles analytiques. De plus elle peut être plus crédible étant donné que son comportement est comparé au système réel. La simulation nous permet également de simuler des phénomènes s'étendant sur une longue période de temps dans un court intervalle de temps de simulation.

Néanmoins la simulation ne comporte pas que des aspects positifs. Elle requiert en effet des niveaux de compétence élevés et son utilité dépend de la qualité du modèle et des aptitudes du concepteur. Elle exige également que les données d'entrée dans le simulateur soient fiables. La simulation ne permet pas non plus de résoudre un problème de façon précise. Elle permet surtout une analyse du comportement du système sous des conditions spécifiées par l'utilisateur [Shannon, 1998].

## **4.2 Modélisation du système urbain**

### **4.2.1 Définition d'un modèle**

Un modèle est une représentation simplifiée d'un objet réel qui donne du sens à cet objet et permet de le comprendre. Néanmoins il faut remarquer que pour réaliser un « bon » modèle il faut avoir compris l'essentiel des propriétés de l'objet que l'on modélise. L'appropriation du savoir implique donc une démarche circulaire [Chamussy, 2004].

Un modèle dynamique est une représentation simplifiée d'un processus du monde réel. Il comporte des données d'entrée et un output. Un modèle est donc une simplification de la réalité. L'erreur et l'approximation font naturellement partie des modèles. On ne cherchera pas à produire dans le cadre de notre modélisation la réalité de manière absolue. Un modèle peut permettre de distinguer le particulier du général et d'établir éventuellement des lois générales quant au système que l'on modélise, ce qui est par exemple le cas dans le cadre de notre recherche sur la morphogenèse [Chamussy, 2004].

Outre cet écart par rapport au réel, il existe aussi une différence entre le modèle et son implémentation informatique [Sudeikat, 2004].

### **4.2.2 Le système à modéliser**

On définit dans ce paragraphe le système que l'on souhaite étudier (cf. § 1.5). Dans le cadre de cette recherche on considère l'espace urbain dans son aspect *matériel* : l'environnement construit comprenant les bâtiments (contenant des fonctions telles que logements, commerces, écoles, hôpitaux,

## CHAPITRE 4 : MODELISATION MULTI-AGENTS DU SYSTÈME URBAIN

### *Modélisation du système urbain*

etc.), les réseaux (routes, voies de chemin de fer, etc.) et l'environnement naturel (zones boisées, étendues d'eau, réseau hydrographique, sol, etc.). Par conséquent, on modélise la *matérialité* de la ville, par opposition à la modélisation, par exemple, de flux d'entrée et de sortie dans le système urbain tels des flux de biens ou de personnes. On souhaite plus précisément modéliser les interactions entre les objets urbains de la métropole, tels des bâtiments entre eux et par rapport à leur environnement ou entre des bâtiments et la commune, c'est-à-dire une interaction multi-échelle. On souhaite en outre montrer comment ces interactions peuvent produire une organisation et conduire à la production de formes émergentes. De plus on souhaite que cette capacité à simuler les interactions mentionnées ci-dessus puisse nous permettre de montrer comment un programme architectural influence l'évolution de la métropole.

### **4.2.3 Modélisation**

L'étape de modélisation concerne surtout la façon dont on doit concevoir un modèle afin qu'il puisse être exécuté dans un ordinateur [Fishwick, 1995]. On associe dans la modélisation le système réel (celui que l'on veut étudier, donc la ville) à la représentation de ce système (le modèle). Les informations nécessaires pour construire ce modèle peuvent être des observations réelles sur le système (statistiques de données historiques sur la morphogenèse urbaine, dans le cadre du projet ce type d'observation n'a pas été réalisé) ou des connaissances empiriques concernant le système (connaissances générales des lois d'architecture et d'urbanisme) et sont formalisées selon une méthodologie donnée [Drogoul et al, 2003]. Dans le cadre du projet, le deuxième type d'information, i.e. l'ensemble des connaissances ont été structurées pour la simulation sous la forme de règles (ou lois) soumises à des probabilités d'occurrence (voire chap. 5).

### **4.2.4 Modélisation multi-échelle du système urbain**

Comme mentionné au chapitre 3 l'approche que nous avons retenue pour simuler la morphogenèse urbaine est une approche par agents vecteurs multi-échelles. Ce chapitre présente la modélisation de la ville. On définit les composants du système multi-agents qu'est la ville : les agents (représentant notamment les bâtiments) et leur comportement. Cette analyse nous permet ensuite de définir l'architecture globale du simulateur (chap. 5).

Comme on l'a vu au chapitre 2 on admet des processus d'interaction multi-échelle dans la ville. Cette interaction peut se dérouler à un même niveau entre des entités de même « catégorie » (par exemple des bâtiments) ou bien entre entités de niveaux hiérarchiques différents (entre la ville et un bâtiment par exemple). On dira que le premier type d'interaction concerne les processus auto-organisés tandis que le deuxième type concerne plutôt la planification, telle qu'on la trouve dans la programmation urbaine (voire à ce sujet la notion de programme architectural, §1.6.1). Ce qui intéresse particulièrement les architectes est la planification stratégique urbaine et notamment le fait de pouvoir comprendre comment le système que constitue la métropole va réagir à l'introduction d'un programme architectural. Afin de répondre à cette vision de la ville décrite ci-dessus on a choisi une modélisation multi-échelle de la ville selon une approche vectorielle. Elle regroupe les éléments construits et les ensembles d'éléments construits (à plusieurs échelles d'observation) de la ville ainsi que les éléments naturels.

## CHAPITRE 4 : MODELISATION MULTI-AGENTS DU SYSTEME URBAIN

### Modélisation du système urbain

Pour notre modélisation nous nous appuyons sur la description multi-niveaux de la ville proposée par [Ruas, 1995] puis reprise par [Boffet, 2001] selon une vision systémique, où la ville est décomposée en systèmes, eux-mêmes décomposés en sous-systèmes. La description de la ville dans une base de données est généralement faite objet par objet, donc au niveau micro [Boffet, 2001]. L'intérêt d'avoir une modélisation multi-échelle est que l'on peut prendre en compte les interactions entre plusieurs niveaux.

Les 3 niveaux de modélisation de la métropole sont présentés à la fig. 19. Les flèches (en rouge) représentent les interactions. On distingue 2 types d'interactions : les interactions entre différentes échelles (ou niveaux) de la ville et les interactions entre objets de la ville à une même échelle. Ces deux types d'interactions déterminent la dynamique et l'organisation de la ville.

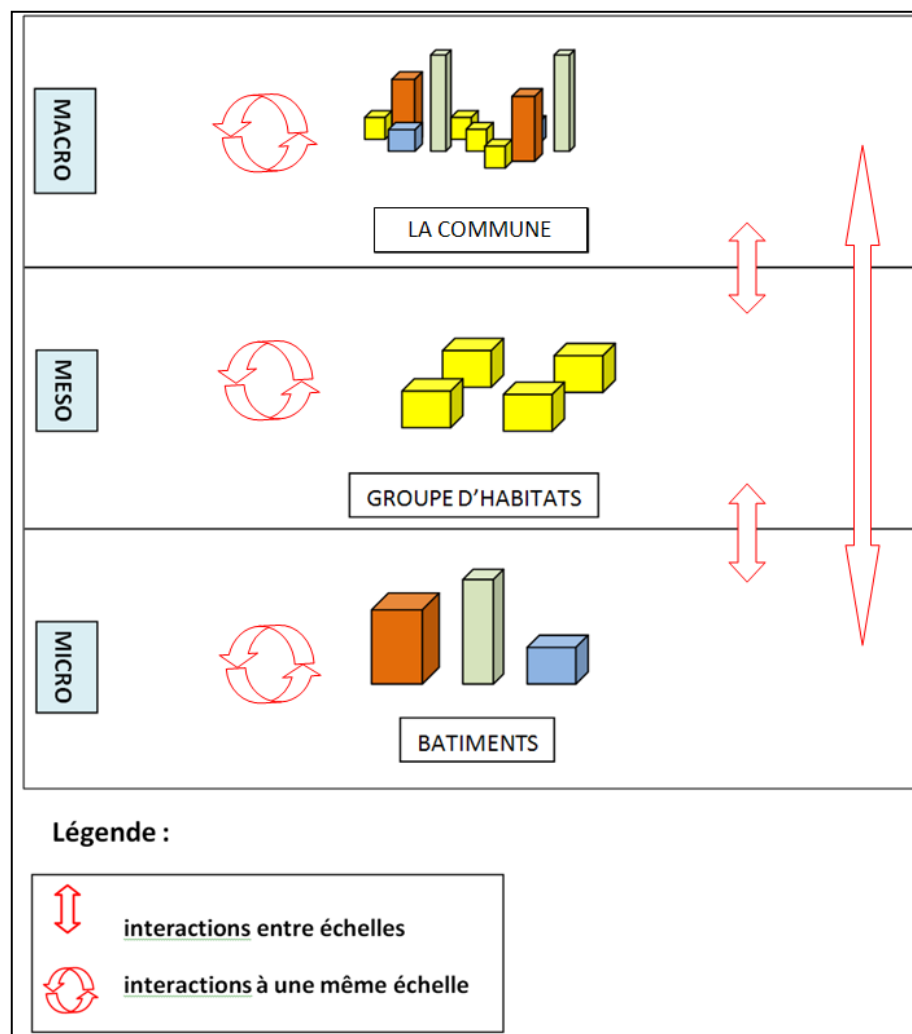


Figure 19: Modélisation multi-échelle de la métropole avec les agents cognitifs



## CHAPITRE 4 : MODELISATION MULTI-AGENTS DU SYSTÈME URBAIN

### *Modélisation du système urbain*

Au premier niveau on trouve les interactions entre les bâtiments, régies selon des règles d'influence. Au niveau directement supérieur on trouve l'interaction entre les groupes d'habitat. Entre le premier et le deuxième niveau on a également des interactions : par exemple l'emplacement d'un nouveau bâtiment peut être fortement conditionné par un groupe de bâtiments existant (par exemple un groupe de bâtiments d'habitation peut faire « pression » sur la commune pour la création d'une école, etc.). Au troisième niveau on trouve l'interaction entre les communes elles-mêmes, notamment entre les instances dirigeantes (ce cas n'est pas considéré dans le cadre de notre recherche). La ville interagit également avec le groupe d'habitats ainsi qu'avec les bâtiments (notamment par ses fonctions dirigeantes).

Les 3 niveaux de modélisation sont présentés ci-dessous.

#### **a) Niveau Micro**

Correspond aux objets pris individuellement. Les agents vecteurs cognitifs à ce niveau sont les bâtiments (avec les fonctions commerce, école, logement, villa, etc.).

On considère les types d'objets micro suivants :

**1. Les éléments bâtis** : cela peut être un bâtiment ou un ensemble de bâtiments mais aussi des surfaces bâties ayant une fonction programmatique bien définie. On distingue parmi les objets bâtis les types suivants :

- **habitat (H)** : concerne essentiellement les bâtiments dédiés aux logements (logements collectifs ou villas).

- **équipement (E)** : concerne principalement les bâtiments dédiés aux services : écoles, hôpitaux, usines, bureaux, cinémas. Ce type de bâtiments joue un rôle important en tant qu'entité attractive ou répulsive.

**2. Les réseaux** : routes, voies de chemin de fer, réseau du métro et réseau hydrographique.

L'échelle micro a une dynamique qui lui est propre. A cette échelle se déroulent de nombreux processus de la morphogenèse.

#### **b) Niveau méso**

Ce niveau correspond à des groupes d'objets micro (groupes de bâtiments, un ou plusieurs quartiers etc.). On a défini à ce niveau les notions de groupe d'habitats [Park, 2009] qui sont des agents vecteur cognitifs. Dans le cadre de la recherche sur la métropole on a également modélisé les systèmes urbains mais on ne va pas les considérer comme des agents dans le cadre de cette thèse.

#### **c) Niveau macro**

Le niveau macro désigne la métropole dans son ensemble, avec les instances dirigeantes. La métropole elle-même est considérée comme un agent vecteur cognitif. A ce stade de la recherche on considère que

## CHAPITRE 4 : MODELISATION MULTI-AGENTS DU SYSTÈME URBAIN

### *Le Degré de Satisfaction*

les objets macro sont les communes. Ces dernières sont notamment caractérisées par une densité moyenne.

## 4.3 Le Degré de Satisfaction

### 4.3.1 Définition et calcul du Degré de Satisfaction

Un bâtiment possédant une seule fonction (par exemple une école) est un agent. Si un bâtiment possède plusieurs fonctions il est considéré comme un programme et on compte un agent par fonction : par exemple un agent *Boutique* pourra se trouver dans un agent *Centre Commercial* qui est considéré comme un agent. Chaque agent de notre système urbain a un ensemble de connaissances sur son environnement et réagit à cet environnement. Il a également des objectifs à accomplir pour sa propre satisfaction (la satisfaction des agents représente en réalité la satisfaction des habitants vivant dans les bâtiments et dans la ville, on associe ainsi la satisfaction des personnes à la satisfaction des bâtiments) et un ensemble de règles comportementales (ou plans d'action) qui dictent son mode d'interaction avec les autres agents du système.

Les agents (bâtiments et autres) de notre système ville ont pour objectif d'évoluer vers la meilleure satisfaction possible. Ils ont notamment pour objectif de se localiser de façon optimale de manière à maximaliser leur satisfaction.

La satisfaction des agents dépend de leur satisfaction par rapport aux lois de morphogenèse énoncées au chap.2 et notamment l'influence des programmes architecturaux du voisinage (services ou nuisances), le voisinage et la visibilité sur des objets symboliques ou naturels (comme par exemple le Lac Léman).

Au niveau local (niveau micro) les agents (école, commerce, logement, etc.) choisissent de se créer en se localisant le plus près possible des services et le plus loin possible des nuisances. Une villa voudra avoir une vue dégagée et se trouver près d'une école et loin d'une usine. Dès qu'une usine se crée près d'une villa la satisfaction de cette dernière baisse et elle risque de disparaître. A un niveau directement supérieur (niveau méso), les quartiers souhaitent également être satisfaits, notamment la localisation de ses divers composants (bâtiments, etc.) doit se faire de manière optimale. L'objectif des quartiers est de maximaliser également leur satisfaction. En outre ces quartiers doivent présenter une homogénéité qui contribue à leur identité : certains bâtiments ne « correspondant » pas à leur environnement sont appelés à disparaître au profit d'autres. C'est une sorte de « sélection naturelle » où certains bâtiments mieux adaptés à leur environnement se multiplient aux dépens d'autres moins conformes. *“Evolution is commonly assumed to involve processes of change in which organisms better adapted to their environments increase in number, often at the expense of those less suited.”* [Batty, 2005].

On définit le *Degré de Satisfaction* (DS) [Plazanet, 2006] d'un agent comme son niveau de contentement par rapport à sa position dans l'espace et notamment par rapport aux influences positives ou négatives se trouvant dans son voisinage. Dans le cadre du projet le DS a seulement été défini pour les agents de type bâtiment dont le processus de création constitue le cœur du prototype de simulation.

## CHAPITRE 4 : MODELISATION MULTI-AGENTS DU SYSTÈME URBAIN

### *Le Degré de Satisfaction*

Le DS a été défini dans un premier temps dans [Plazanet, 2006] et ensuite modifié dans [Silva et al, 2008] notamment en ce qui concerne le calcul indépendant du DS en fonction de la relation de service entre les agents dans laquelle on se trouve (cf. fig.19) ainsi que l'intégration de la visibilité et de l'exposition solaire.

Le DS dépend de manière générale des lois d'influence fonctionnelle :

- **Influence positive** : services (par exemple une école aura une influence positive sur une villa)
- **Influence négative** : nuisances (une usine aura une influence négative sur une villa)
- **Influence des objets** possédant un pouvoir symbolique (une église ou une montagne aura une influence très positive sur une villa, car elle pourra avoir une grande signification symbolique pour les gens qui y vivent).

En plus des ces influences de base on peut étendre le calcul du *Degré de Satisfaction* et prendre en compte les paramètres suivants :

- **Visibilité** des bâtiments sur des objets possédant un pouvoir symbolique (montagne, lac). Dans le contexte de notre recherche ce paramètre est susceptible d'avoir une grande importance, car notre zone d'étude se trouve dans la région lémanique, dans laquelle se trouvent un lac et des montagnes possédant un fort pouvoir symbolique.
- **Ensoleillement** (l'introduction de ce paramètre restera à un niveau conceptuel)

Le DS est analogue dans son principe au modèle gravitaire utilisé en géographie pour étudier la répartition des interactions entre des objets qui dépendent de la force d'attraction de chacun. Le modèle gravitaire doit son nom notamment à l'analogie qu'il représente avec la loi de gravitation de Newton : deux corps s'attirent avec une force proportionnelle à leur masse et inversement proportionnelle à la distance qui les sépare [Pumain, 2004]. De la même façon le DS modélise le fait que plus un bâtiment est proche d'un service plus il est satisfait et à l'inverse plus le bâtiment se trouve proche d'une nuisance plus sa satisfaction est faible.

Nous nous référons maintenant à la fig. 20. Un agent désigné par la lettre  $a$  possède dans son voisinage des influences positives (carrés verts) et des influences négatives (carrés rouges). Il a également des voisins possédant la même fonction (carrés bleus). La distance de l'agent  $a$  à un objet influençant  $a_i$  est notée  $d(a, a_i)$ . Chaque objet possède également une distance notée  $\Delta(a_i)$  correspondant à sa hauteur et désignant un seuil de séparation minimum avec les autres objets. C'est-à-dire que si un objet se trouve à une distance inférieure à cette distance minimum d'un autre objet alors son DS vaut 0.

**CHAPITRE 4 : MODELISATION MULTI-AGENTS DU SYSTÈME URBAIN**  
*Le Degré de Satisfaction*

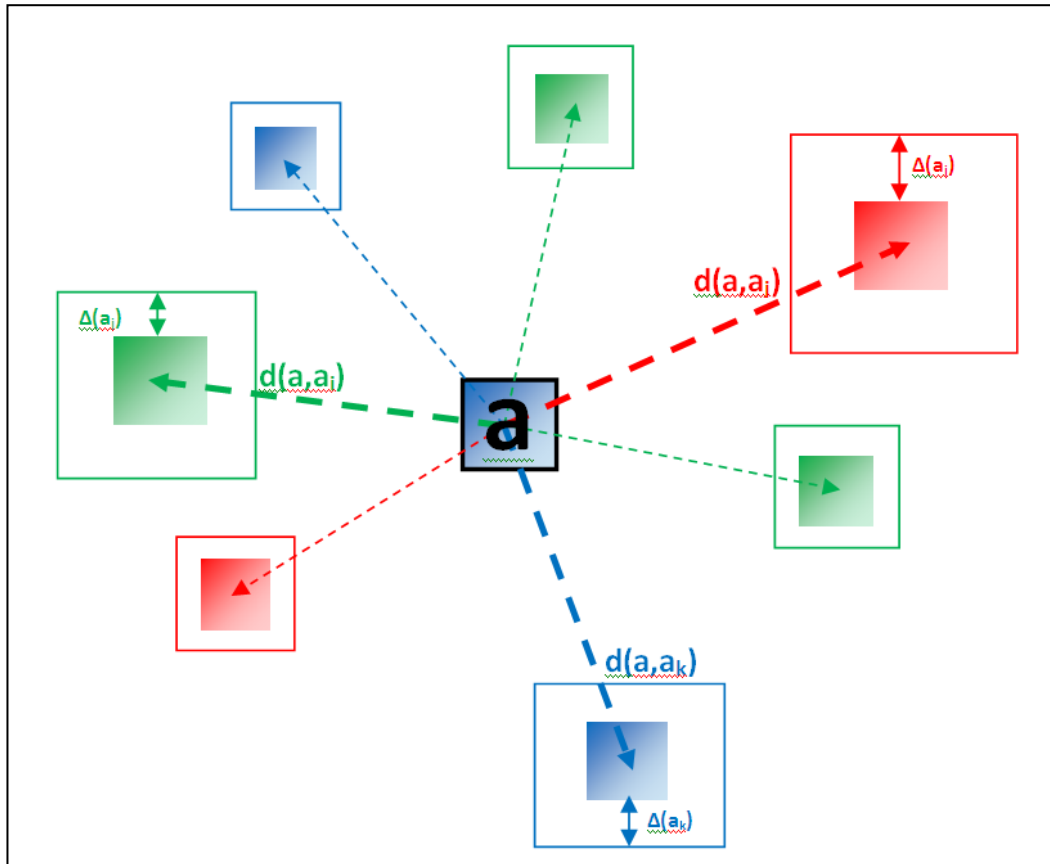


Figure 20: Degré de Satisfaction des Agents

Comme dans le cas du modèle gravitaire plus l'agent  $a$  se trouve proche d'un objet d'influence positive (tout en respectant la distance de séparation minimum  $\Delta(a_i)$ ) plus son DS sera élevé. Le DS sera maximal pour une distance  $\Delta(a_i)$  à l'objet d'influence positive et au-delà d'une certaine distance l'objet d'influence positive n'aura plus aucune influence sur le DS de l'agent  $a$ . A l'inverse plus il se trouve proche d'un objet d'influence négative plus son DS sera bas et vaudra zéro si la distance minimum  $\Delta(a_i)$  n'est pas respectée.

On définit le DS des deux manières suivantes :

- Par rapport à un objet d'influence positive (service):  
 Le type d'influence de l'agent  $a_i$  sur  $a$  est du type *service*, on a : Type\_influence ( $a_i, a$ ) = **S**

$$DS(a, a_i) = 100 * \left(1 - \frac{d(a, a_i) - \Delta(a_i)}{Max\_inf(a_i, a)}\right)$$

- Par rapport à un objet d'influence négative (nuisance) :  
 Le type d'influence de l'agent  $a_i$  sur  $a$  est du type *nuisance*, on a : Type\_influence ( $a_i, a$ ) = **N**

$$DS(a, a_i) = 100 * \left(\frac{d(a, a_i) - \Delta(a_i)}{Max\_inf(a_i, a)}\right)$$

## CHAPITRE 4 : MODELISATION MULTI-AGENTS DU SYSTÈME URBAIN

### Le Degré de Satisfaction

Avec les variables suivantes :

**a** : agent pour lequel on calcule le DS

**a<sub>i</sub>** : objet influençant (pouvant être un agent) l'agent *a*

**Δ(a<sub>i</sub>)** : hauteur de l'objet a<sub>i</sub> et correspondant à la distance de séparation minimum entre a<sub>i</sub> et un autre objet ou agent.

**Max\_inf (a<sub>i</sub>, a)** : rayon d'influence maximum de l'objet a<sub>i</sub> sur l'agent *a*.

**DS (a, a<sub>i</sub>)** : degré de satisfaction de l'agent *a* par rapport à l'objet a<sub>i</sub>.

On considère pour chacune des deux définitions ci-dessus la condition suivante:

**DS (a, a<sub>i</sub>)=0, si 0 < d (a, a<sub>i</sub>) < Δ(a<sub>i</sub>)**

La fig. 21 illustre le fait que pour un objet d'influence positive :

- Le DS (a, a<sub>i</sub>)=0, si 0 < d (a, a<sub>i</sub>) < Δ (a<sub>i</sub>)
- Le DS (a, a<sub>i</sub>) atteint sa valeur maximale lorsque d (a, a<sub>i</sub>) = Δ (a<sub>i</sub>)
- Le DS décroît linéairement (relation de premier ordre entre le DS et la distance) depuis Δ (a<sub>i</sub>) jusqu'à *Max\_inf*, distance à partir de laquelle il vaut zéro.

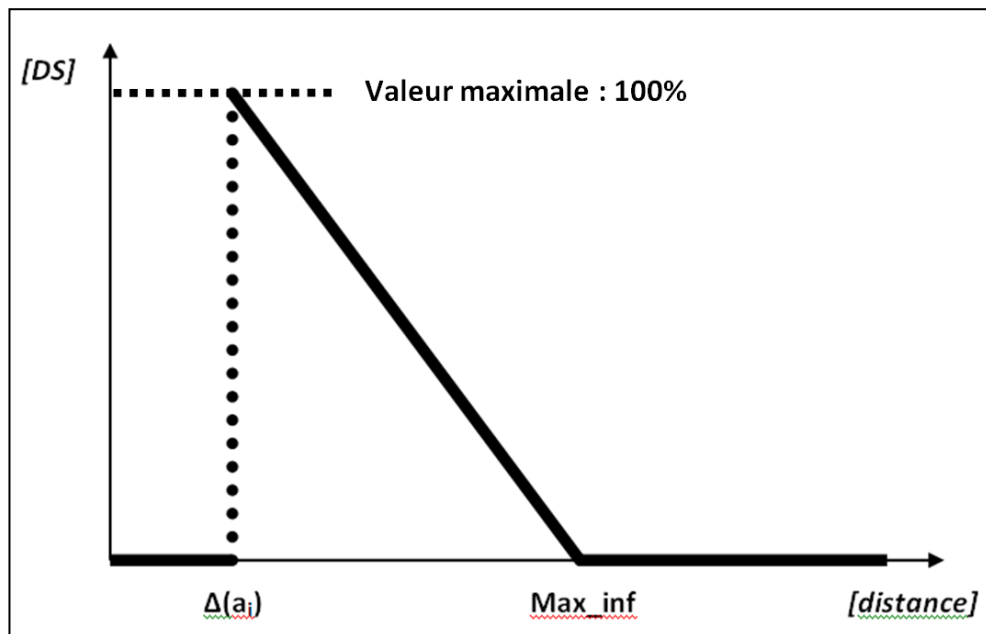


Figure 21: Valeur du Degré de Satisfaction d'un agent selon la distance à un objet influençant

On définit le DS global exprimé en % (de 0 à 100) d'un agent par rapport à toutes les influences positives et négatives et de voisinage par la formule suivante :

$$DS(a) = \frac{\sum_{i=1}^n DS(a, a_i) * C_{inf}(a, a_i)}{\sum_{i=1}^n C_{inf}(a, a_i)}$$

**CHAPITRE 4 : MODELISATION MULTI-AGENTS DU SYSTÈME URBAIN**  
*Le Degré de Satisfaction*

Avec :

$C_{inf}(a_i, a)$  : coefficient d'influence désignant la valeur de l'influence de l'objet  $a_i$  sur l'agent  $a$  et ayant des valeurs dans l'intervalle  $[0, 10]$ .

La formule désigne simplement le fait que le DS global est le résultat de la somme des DS ( $a, a_i$ ) pondérée par l'importance accordée à l'influence de l'objet  $i$ .

Par exemple le DS de l'agent  $a$  avec les valeurs et la configuration données à la fig. 22 vaut :

$$DS(a) = \frac{\left(1 - \frac{400-10}{800}\right) \times 9 + \left(\frac{1000-12}{2000}\right) \times 9 + \left(1 - \frac{100-10}{200}\right) \times 5}{9+9+5} = 0.53 = 53\%$$

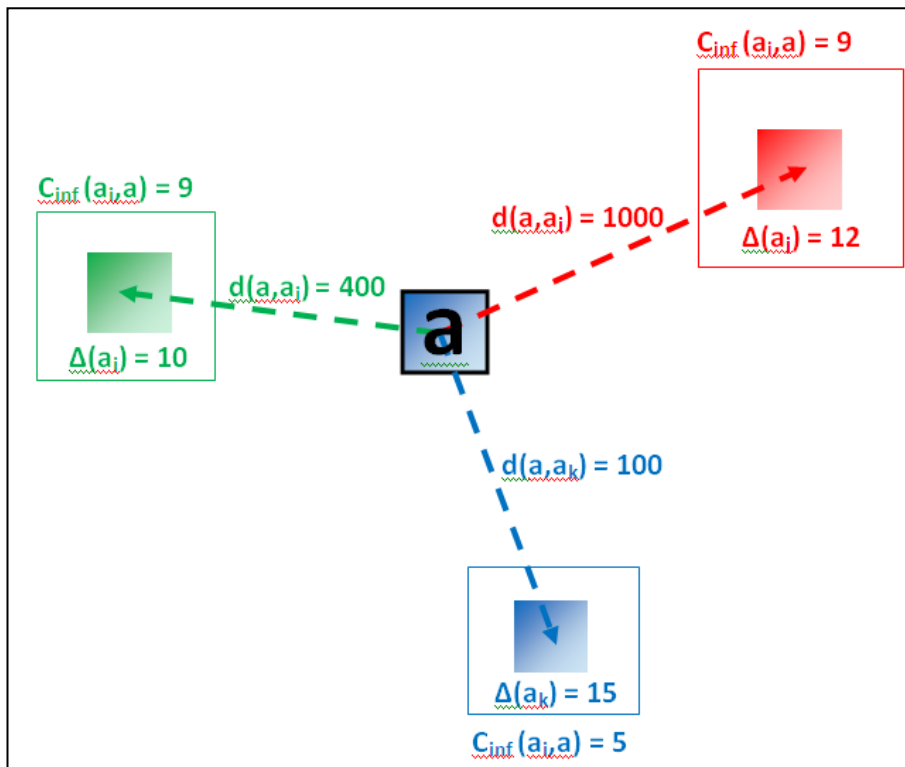


Figure 22: Exemple de calcul du DS

Une des principales critiques que l'on peut faire à cette formalisation de l'influence entre programmes est que le DS est défini comme un modèle statique dans le sens où il ne prend pas en compte l'évolution de la configuration spatiale des bâtiments et notamment la dynamique des groupes de bâtiments qui sont susceptibles d'influencer la création de nouveaux bâtiments. Mais cela semble avoir a priori peu d'influence sur le résultat final de la simulation si l'on intègre dans le simulateur les principes qui régissent la dynamique des groupes (notamment leur extension/complétude).

## CHAPITRE 4 : MODELISATION MULTI-AGENTS DU SYSTÈME URBAIN

### Le Degré de Satisfaction

Le calcul du DS se fait selon plusieurs étapes montrées à la fig. 23.

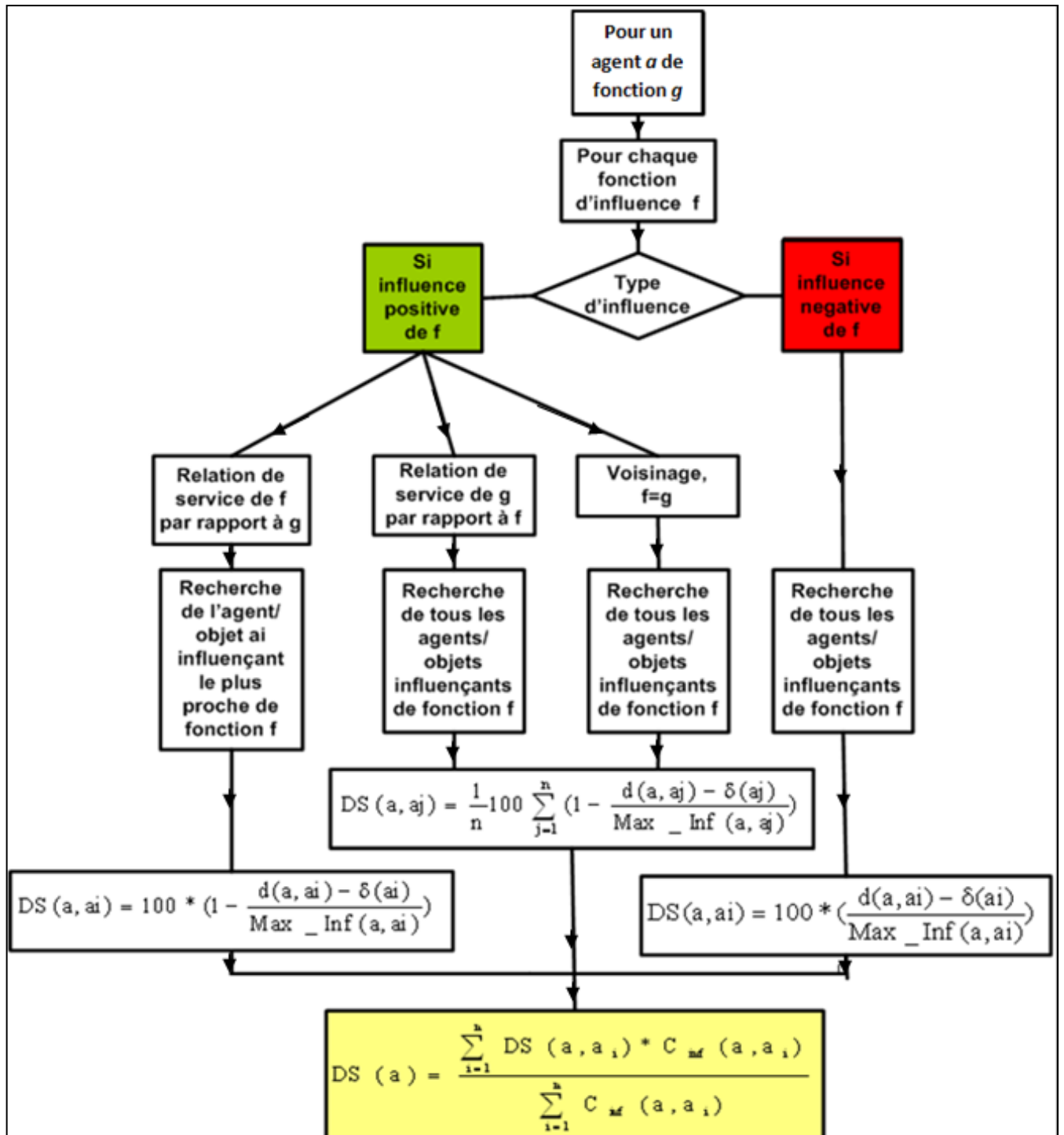


Figure 23: Calcul du DS selon l'influence fonctionnelle positive ou négative

## CHAPITRE 4 : MODELISATION MULTI-AGENTS DU SYSTÈME URBAIN

### *Le Degré de Satisfaction*

On considère les deux cas suivants :

#### **a) Influence positive**

*Relation de service de f par rapport à g :*

Dans ce cas le calcul du *DS* de l'agent a par rapport à une influence positive de service (par exemple la satisfaction d'un logement par rapport à une école ou la satisfaction d'un commerce par rapport aux entrées/sorties d'autoroute), seul l'objet le plus proche est pris en compte (par exemple on calcule la satisfaction du logement par rapport à l'école la plus proche et non pas par rapport à toutes les écoles).

*Relation de service de g par rapport à f :*

Dans ce cas on calcule le *DS* par rapport à tous les objets sur lesquels g a une influence (par exemple on calcule le *DS* d'une école par rapport à tous les logements se trouvant dans son rayon d'influence).

*Voisinage :*

Pour le calcul du *DS* en rapport avec la satisfaction de voisinage on considère tous les voisins de même fonction dans un buffer de rayon correspondant au *Max\_inf* et on calcule le *DS* par rapport à chacun de ces voisins.

#### **b) Influence négative**

Pour les fonctions répulsives (par exemple les usines pour les logements) on considère tous les objets influençants dans un buffer de rayon *Max\_inf* et on calcule le *DS* par rapport à chacun de ces objets.

### **4.3.2 Prise en compte d'autres paramètres pertinents dans le calcul du DS**

Etant donné la situation géographique de la zone de test : métropole lausannoise avec vue sur le lac Léman, on a introduit un nouveau paramètre déterminant pour le calcul de la satisfaction des bâtiments. On a ainsi introduit la satisfaction d'un bâtiment par rapport à sa visibilité sur le lac Léman : un bâtiment (suivant sa fonction) est plus satisfait s'il a une vue sur le lac.

#### **a) Méthode de calcul de la visibilité à partir du LIDAR**

L'utilisation du système LIDAR m'a aussi permis de valider le prototype quant à sa capacité à avoir un accès facilité à un grand nombre de données qui servent comme données d'entrée dans le système (cf. chap.6).

Le LIDAR est une technologie émergente qui intègre des capteurs afin d'obtenir des coordonnées 3D (x, y, z) très précises de points situés sur la surface de la terre, tels que des points au sol, des bâtiments ou des arbres [Silva et al, 2008]. Les données issues du système LIDAR présentent une résolution intéressante : au moins 6 à 8 points/m<sup>2</sup> qui diffèrent notablement des données de SwissTopo que nous avons en notre possession (résolution 25 m du MNT25).



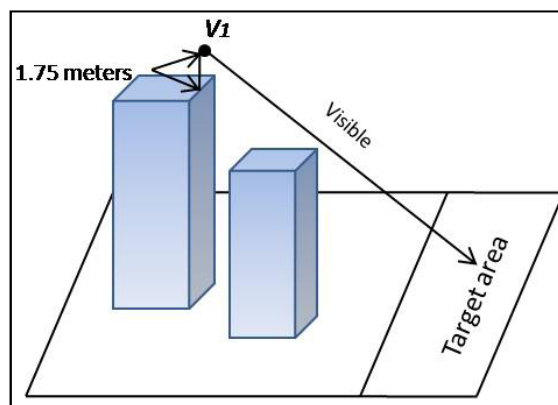
## CHAPITRE 4 : MODELISATION MULTI-AGENTS DU SYSTÈME URBAIN

### *Le Degré de Satisfaction*

Dans le domaine de l'analyse du paysage, la visibilité est définie comme étant une surface de terre, d'eau ou d'autres objets de l'environnement qui sont visibles depuis un point fixe donné. Depuis ce point la visibilité est l'ensemble des points au sol que l'observateur peut voir.

Dans le système d'analyse de visibilité qui prend en considération certains critères liés à la modélisation multi-agents vectorielle de la morphogenèse urbaine, une évaluation de tous les points-cible visibles depuis un point donné a été implémentée. Dans notre étude de cas (dans la métropole lausannoise) on a réalisé une analyse du pourcentage de la surface visible du lac Léman depuis des points du territoire et on a introduit la valeur de ce paramètre comme input dans le prototype de simulation. Il est à noter qu'il serait important de considérer la visibilité sur tous les objets présentant un intérêt potentiel par rapport à la vue (vue sur des monuments historiques, des sommets montagneux) [Soguel, Martin, Tangerini, 2008].

Le point de location est désigné par un point  $V$  (fig. 24) et la surface est représentée par une grille de (1x1 m) tandis que les points centraux de chaque cellule sont considérés comme étant les points-cibles (Target area). Dans l'étude de cas le système d'analyse de visibilité évalue les points appartenant au lac Léman qui sont visibles depuis le point d'observation  $V$ .



**Figure 24: Zone visible (Target area) depuis un point ( $V1$ ) situé au sommet d'un bâtiment [Silva et al, 2008]**

Cette manière de définir la visibilité peut être critiquable. En effet il serait plus pertinent de définir la visibilité depuis un point comme un angle de vision sur un objet donné : plus cet angle est grand plus la visibilité est élevée. Dans la méthodologie que nous avons choisie la surface du lac que l'on voit depuis un point peut être vue sous un petit angle et pourtant être grande et correspondant donc à une grande visibilité. Pour des raisons méthodologiques nous n'avons pas pu procéder à l'implémentation de la visibilité suivant un angle de vision. Afin de maintenir une certaine vraisemblance à la définition de la visibilité sur laquelle nous nous sommes basés, nous avons limité notre étude à une petite portion du lac Léman, le long de la berge (fig. 25).

L'attribut visibilité est ensuite mis à jour dans la table des bâtiments, exprimé en termes de pourcentage de visibilité par rapport à la surface totale du lac Léman. D'autres éléments du territoire pourraient ultérieurement être pris en compte dans le calcul de la visibilité (notamment la vue sur des monuments

## CHAPITRE 4 : MODELISATION MULTI-AGENTS DU SYSTÈME URBAIN

### *Le Degré de Satisfaction*

historiques à fort pouvoir symbolique, vue sur les Alpes, etc.). Le modèle conceptuel devrait ainsi être modifié afin de lier chaque bâtiment à un objet du territoire potentiellement intéressant du point de vue de la visibilité.

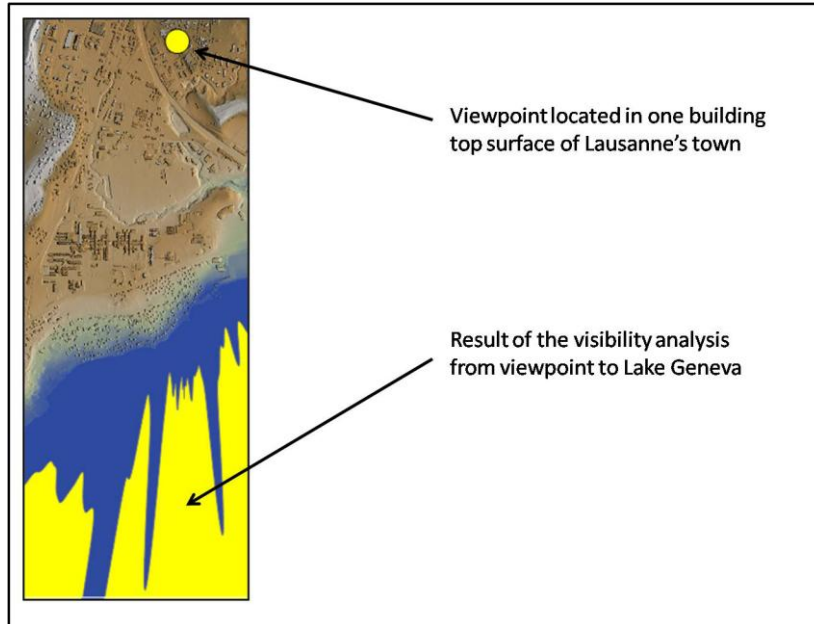


Figure 25: Exemple d'analyse de visibilité sur le lac Léman à partir d'un point d'observation situé sur la surface du sommet des bâtiments

### **b) Intégration des paramètres d'exposition solaire dans le calcul du DS**

Etant donné la rapidité du développement des villes contemporaines et la concentration importante de bâtiments et de personnes, l'analyse de l'exposition solaire des bâtiments est devenue un sujet important dans le domaine de la planification urbaine, notamment dans l'évaluation de la qualité de vie.

L'ensoleillement des bâtiments, défini comme le nombre d'heures/jour de radiation solaire reçue par un bâtiment ou un ensemble de bâtiments, est de longue date une préoccupation importante en planification urbaine. Cela a été notamment mis en application, par le biais de règlements, dans la planification de la ville de New York et dans d'autres villes à travers le monde.

Le système d'analyse de l'ensoleillement est similaire à celui de la visibilité présenté au précédent paragraphe. Il considère la position du soleil comme un point d'observation et la surface des cellules de la grille comme la surface cible. La surface-cible possède un attribut correspondant au nombre d'heures de radiation solaire directe.

L'intégration de l'exposition solaire dans notre modèle de simulation restera à un niveau conceptuel.

D'autres paramètres pourraient venir enrichir la définition de notre DS. Ils sont à définir par les architectes et urbanistes.

## CHAPITRE 4 : MODELISATION MULTI-AGENTS DU SYSTÈME URBAIN

### Algorithme de localisation des bâtiments

#### c) Formule finale du Degré de Satisfaction

Nous avons donc introduit dans le calcul du DS les paramètres suivants (fig. 26) :

- **DS(a,v)**, visibilité: pourcentage de visibilité sur le lac. C'est le Degré de Satisfaction d'un bâtiment par rapport à la visibilité. On considère cette influence comme positive.

- **DS(a,s)**, exposition solaire : nombre d'heures de radiation solaire normalisées et exprimées comme un pourcentage. C'est le *Degré de Satisfaction* d'un bâtiment par rapport à l'exposition solaire.

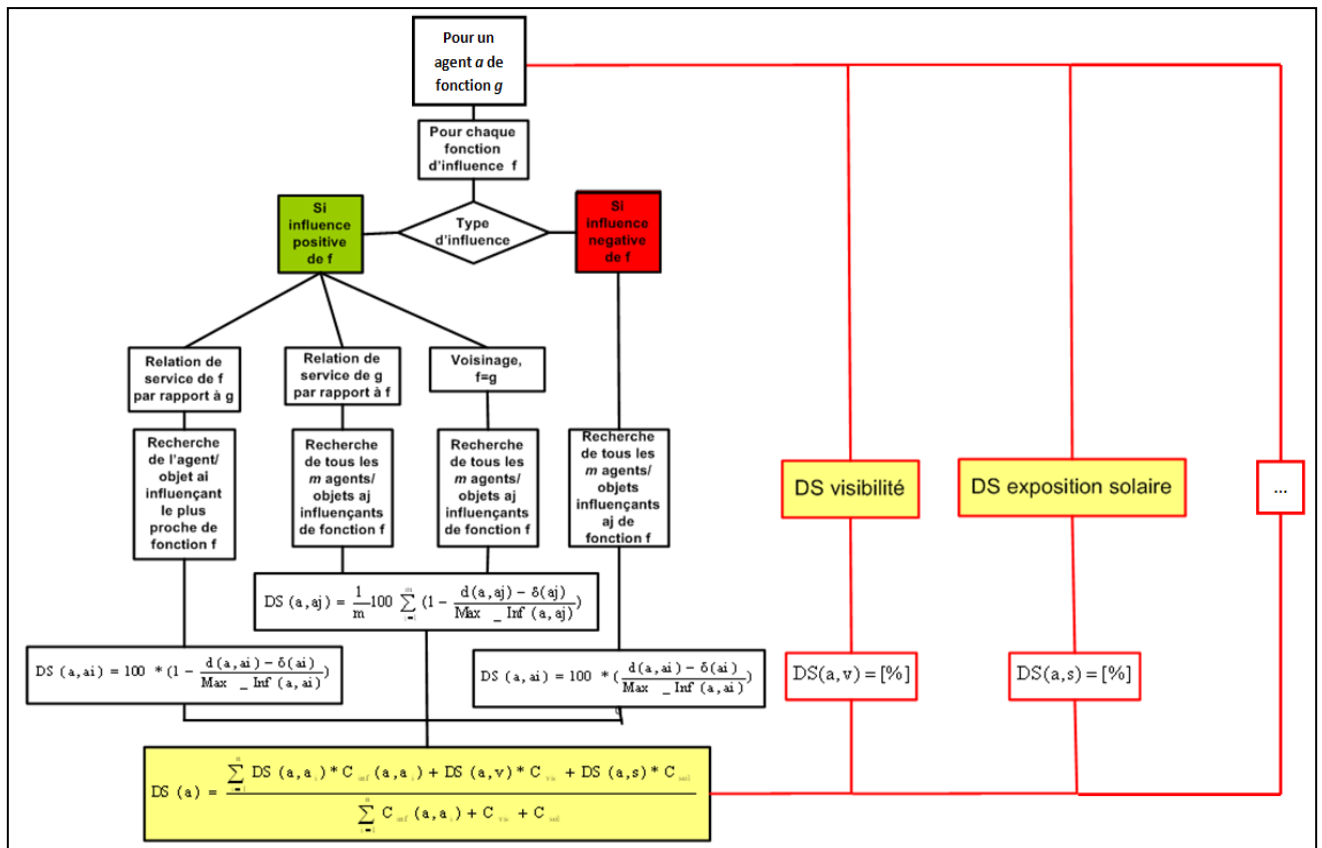


Figure 26: Intégration de la visibilité et de l'exposition solaire dans le calcul du DS

## 4.4 Algorithme de localisation des bâtiments

### 4.4.1 Recherche des points de localisation potentielle de meilleure satisfaction

La recherche de localisation des bâtiments se fait sur un espace discrétisé. Plus précisément on place les nouveaux bâtiments à créer le long des routes à une certaine distance. En outre il faut que l'emplacement des nouveaux bâtiments soit situé sur une zone d'affectation correspondant au type de fonction. L'emplacement le long des routes va être échantillonné en plusieurs points de localisation

## CHAPITRE 4 : MODELISATION MULTI-AGENTS DU SYSTÈME URBAIN

### Algorithme de localisation des bâtiments

potentielle. Pour chaque point de localisation potentiel on va calculer le *Degré de Satisfaction* et le bâtiment sera localisé à l'emplacement dont le *Degré de Satisfaction* est maximum.

Maintenant on présente la méthodologie de création de nouveaux bâtiments. A ce stade de la recherche, on part du principe que l'on a choisi la zone d'affectation où l'on veut placer le bâtiment ainsi qu'approximativement le point où l'on veut placer le centre de gravité du bâtiment. Le choix du point final suit les étapes suivantes :

#### a) Etape 1 : Echantillonnage

Dans un premier temps on cherche la route la plus proche du point. Une fois la route trouvée on veut localiser le bâtiment le long de la route. On doit donc choisir de part et d'autre de l'axe du réseau des points potentiels de localisation. La procédure pour obtenir ces points est la suivante : on copie par translation le réseau de part et d'autre de son axe d'une distance de 5 m (fig.27). On échantillonne les « clones » pour obtenir des points espacés de 5 mètres.

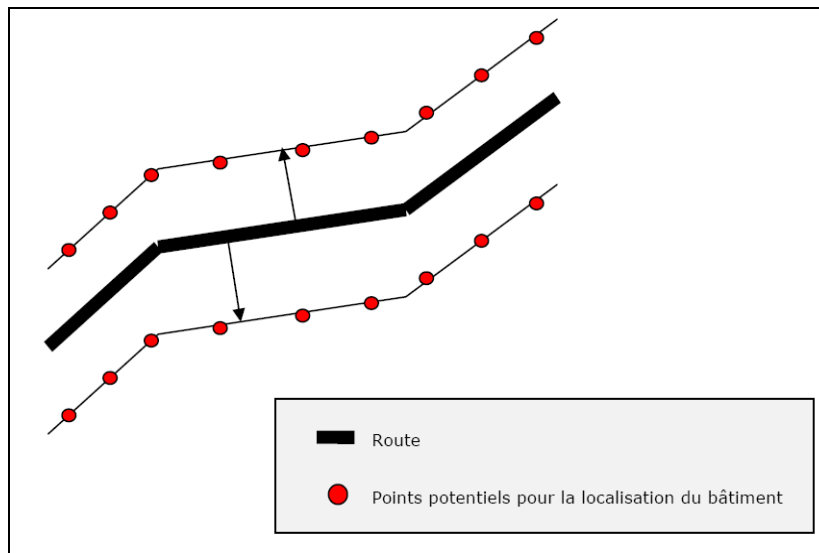


Figure 27: Points potentiels pour la localisation du bâtiment

#### b) Etape 2 : Intersection

Ensuite on vérifie si les points sont disponibles pour y superposer le bâtiment. Pour ce faire on crée un *buffer* autour du point (un cercle centré sur le point de 12 m de rayon) et on vérifie l'intersection éventuelle avec d'autres surfaces déjà présentes dans le domaine d'étude. On ne retient que les points dont le buffer n'a pas d'intersection avec d'autres surfaces. La fig.28 montre l'intersection éventuelle entre le buffer et les autres surfaces. Les points A et C sont les points retenus car ils n'ont pas d'intersection avec d'autres surfaces.

## CHAPITRE 4 : MODELISATION MULTI-AGENTS DU SYSTÈME URBAIN

### Algorithme de localisation des bâtiments

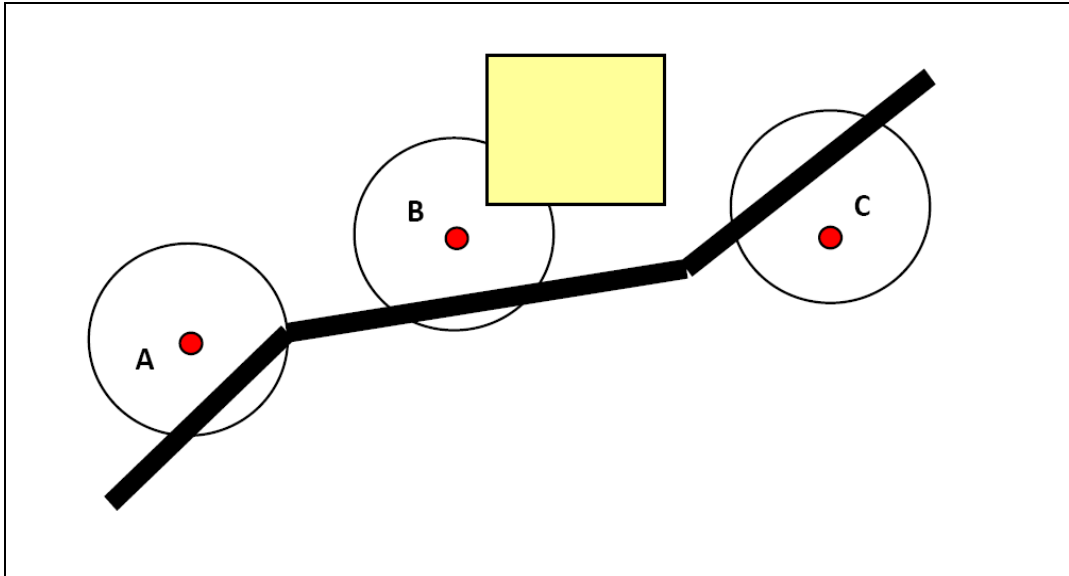


Figure 28: Intersection des buffers avec les surfaces existantes

#### c) Etape 3 : Calcul du *Degré de Satisfaction* pour chaque point

Dans un troisième temps le *Degré de Satisfaction* (DS) est calculé pour chaque point. Le point de DS maximal est retenu pour la localisation du bâtiment à créer. Le centre de gravité du polygone qui représente le bâtiment est ensuite placé sur ce point (fig.29).

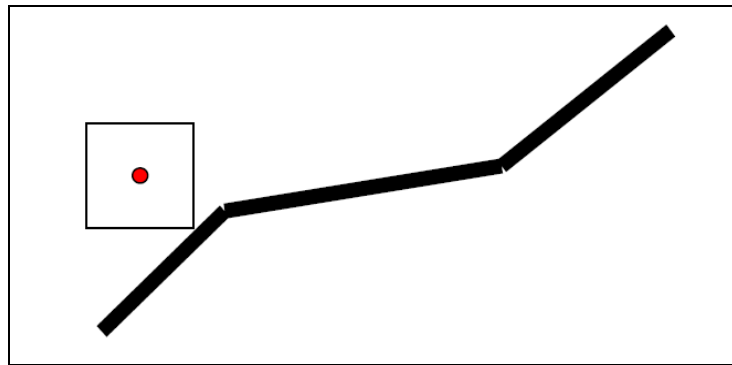


Figure 29: Localisation du polygone représentant le bâtiment sur le point retenu

#### 4.4.2 Forme géométrique et orientation des bâtiments à créer

A partir d'une surface type définie pour chaque fonction (voire table des fonctions), on a généré des formes rectangulaires pour la création des bâtiments. Les formes créées sont orientées parallèlement à la route la plus proche (selon une approche par moindres carrés).

L'algorithme développé [Plazanet, 2008] est le suivant :

1. Tirage aléatoire de la longueur des côtés du rectangle à générer (fig. 30):

## CHAPITRE 4 : MODELISATION MULTI-AGENTS DU SYSTÈME URBAIN

### Algorithme de localisation des bâtiments

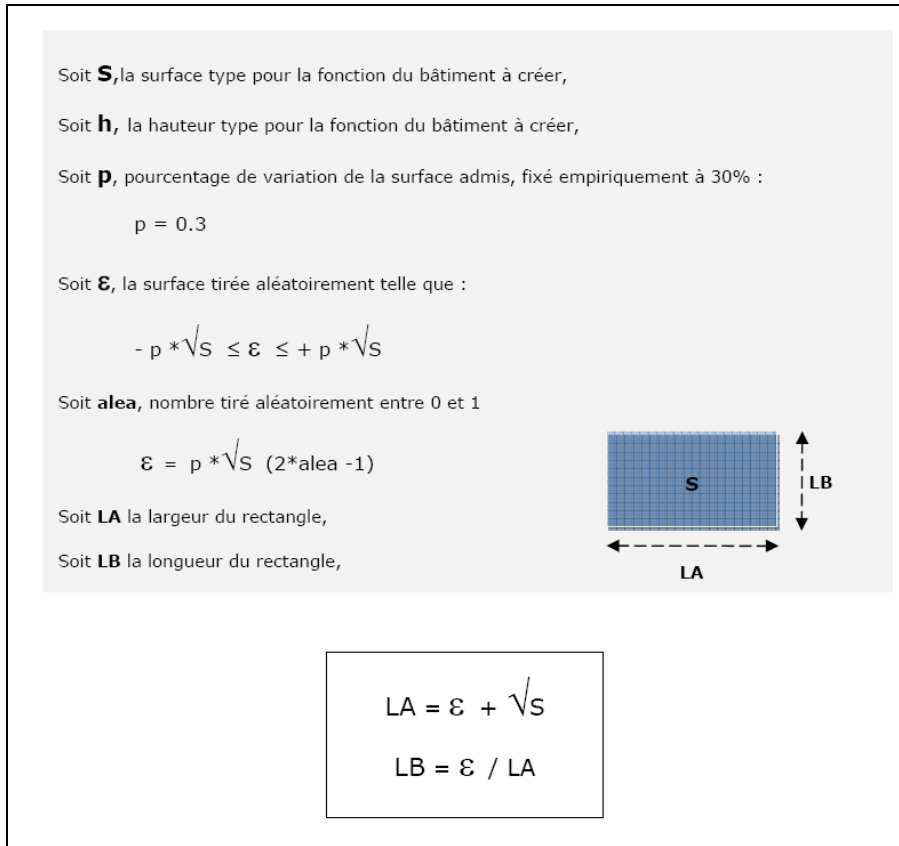


Figure 30: Algorithme de tirage aléatoire de la longueur des côtés du rectangle à générer [Plazanet, 2008]

#### 2. Calcul des coordonnées du bâtiment et alignement avec la route la plus proche (fig. 31):

C'est une première approche pour la localisation des bâtiments. Ce type d'approche pourra s'étendre au calcul de formes plus complexes comme la création de groupes de bâtiments, de quartiers et de systèmes urbains [Park, 2009]. En outre il faudra considérer d'autres contraintes liées à l'environnement telles que la pente ou encore l'orientation par rapport à des objets à fort pouvoir symbolique présents dans le territoire.

## CHAPITRE 4 : MODELISATION MULTI-AGENTS DU SYSTEME URBAIN

### Synthèse

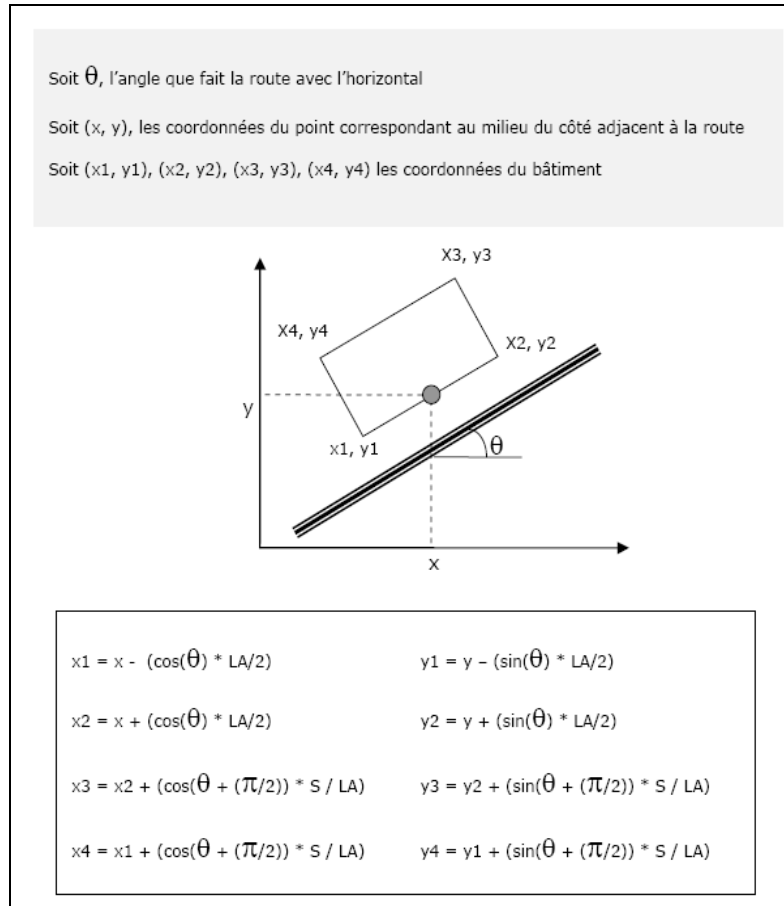


Figure 31: Calcul des coordonnées du bâtiment à créer [Plazanet, 2008]

## 4.5 Synthèse

Pour résumer les éléments du système urbain que l'on considère comme étant des agents vecteurs cognitifs sont les suivants :

- les Bâtiments
- les Groupes d'Habitats
- la Commune

Ces trois types d'agents correspondent à trois échelles différentes, telles que présentées à la fig. 15. Dans le cadre de notre recherche on s'est limité à ces trois types d'agents qui permettent de prendre en compte les processus d'interaction multi-échelles.

Par rapport au modèle de la boîte noire présenté au chapitre 3 le *Degré de Satisfaction* est la formule mathématique qui permet de mettre en relation les données d'entrée (fonction et situation géographique des bâtiments dans la zone pilote, etc.) et les données de sortie (emplacement des nouveaux bâtiments créés, morphogenèse des groupes, etc.).





## CHAPITRE 5 : CONCEPTION ET IMPLEMENTATION DU PROTOTYPE

*Ce chapitre présente la plateforme de développement choisie pour l'implémentation de notre prototype de simulation multi-agents. Il décrit la définition logicielle des agents de notre système ainsi que leur mode d'interaction. Il présente également les algorithmes de détection des groupes urbains utiles pour la phase de validation de notre simulateur.*

### 5.1 La plateforme de développement utilisée

#### 5.1.2 GeOxygene

Notre outil de simulation est développé sur GeOxygene. GeOxygene [Badard et Braun, 2004] est une plateforme de recherche SIG open-source développée au Laboratoire COGIT de l'IGN en France. Une des raisons du choix de la plateforme GeOxygene réside dans son interopérabilité. Les SIG commerciaux standard ne sont en principe pas interopérables et ainsi une application développée sur un SIG donné ne pourra pas être utilisée sur une autre plateforme sans modifications importantes. Les SIG commerciaux ont souvent des langages propriétaires et on est astreint à recoder les mêmes algorithmes pour différentes plateformes. En outre les utilisateurs sont fortement dépendants des innovations technologiques du logiciel. Enfin, les SIG commerciaux ne sont pas à proprement parler des Systèmes de Gestion de Bases de Données (SGBD) [Badard, Braun et Ruas, 2005].

GeOxygene fait partie des nouvelles technologies de génie logiciel qui ont récemment émergé et font suite à un effort de standardisation. On a aussi assisté au développement de langages de programmation standardisés, orientés objets et extensibles tels que Java, de langages de modélisation tels que UML basés sur le concept de composants réutilisables, de SGBD relationnels permettant le stockage de données à composante spatiale (PostgreSQL avec extension spatiale PostGIS) [Badard, Braun et Ruas, 2005].

GeOxygene a la capacité de fournir aux utilisateurs un cadre ouvert, centralisé et documenté pour le développement d'applications de recherche. La structure de GeOxygene est donnée par la fig. 32. GeOxygene est composé de bibliothèques (packages *Java*) de fonctions SIG comme par exemple des calculs de distance dans un réseau. La traduction des classes Java en tables dans le SGBD relationnel s'effectue à l'aide d'un mapping (fig. 28). GeOxygene fonctionne sur le logiciel libre *Eclipse* [Badard, Braun et Ruas, 2005].

## CHAPITRE 5 : CONCEPTION ET IMPLEMENTATION DU PROTOTYPE

La plateforme de développement utilisée

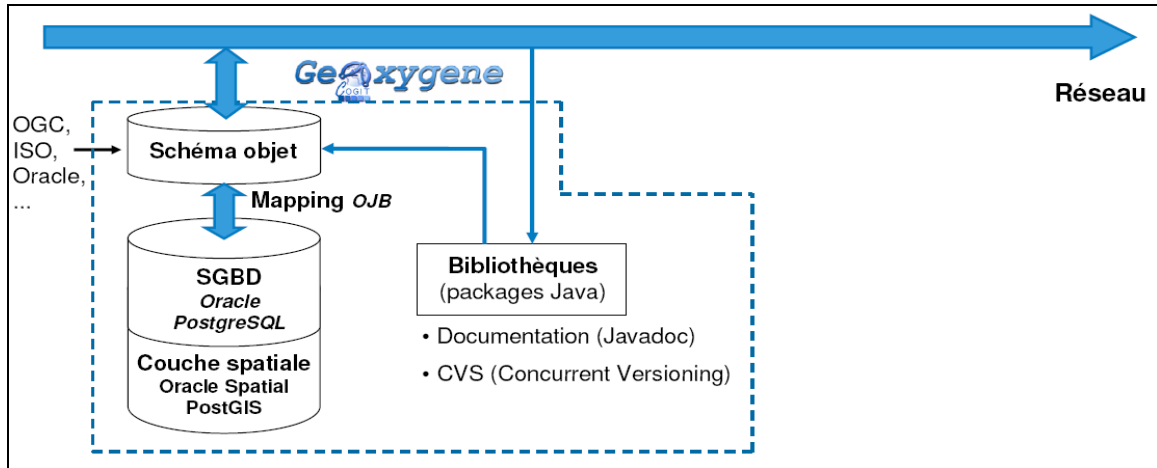


Figure 32: Structure de GeOxygene [Badard, Braun et Ruas, 2005]

*Eclipse* est un environnement de développement polyvalent permettant de créer des projets de développement. Il est écrit en Java et ce langage est notamment utilisé pour écrire des extensions. Le langage Java permet l'évolution logicielle du prototype développé, étant donné que c'est un langage orienté objets. En outre d'autres langages de programmation sont supportés par la plateforme *Eclipse*, tels que : PHP, C#, C++, Python, SQL, etc. grâce à l'ajout de plugins.

GeOxygene nous a permis de modéliser notre système en UML, de le programmer en Java et de faire des traitements en relation avec le SGBD sans traitements SQL. Le lien (mapping) entre le programme Java (orienté objet) et la base de données est effectué par le logiciel open-source OJB (Object Relational Bridge). GeOxygene nous donne également accès à des traitements géographiques stockés dans des librairies [Badard, Braun et Ruas, 2005].

Les données géographiques sont chargées et converties grâce à un chargeur POSTGIS intégré (shp2pgsql) (fig. 33).

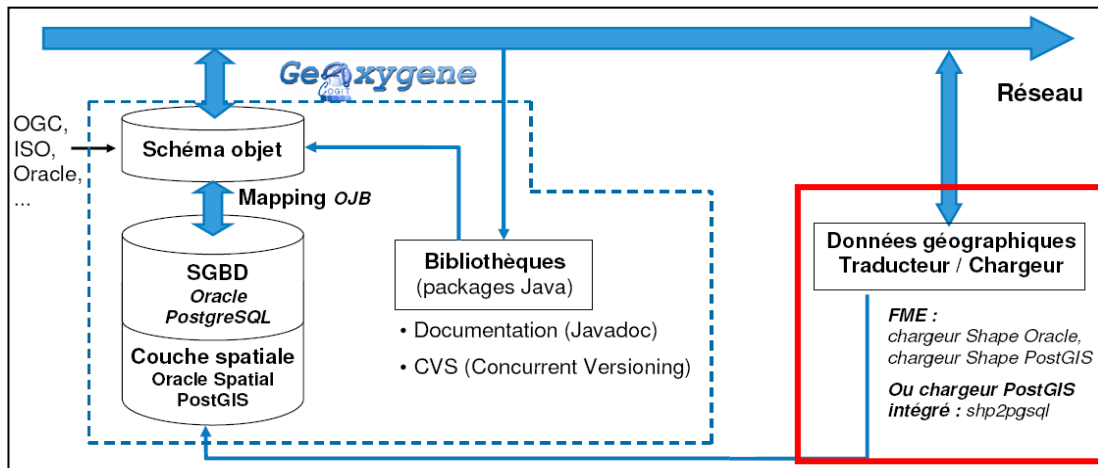


Figure 33: Mapping dans GeOxygene [Badard, Braun et Ruas, 2005]

## CHAPITRE 5 : CONCEPTION ET IMPLEMENTATION DU PROTOTYPE

### *Les quatre composantes du modèle de simulation multi-agents*

GeOxygene nous permet également de visualiser les données géographiques. Pour conclure le choix de GeOxygene permet une réutilisation possible du logiciel développé tout en étant libre des contraintes des logiciels « propriétaires ».

## 5.2 Modèle du système à implémenter

La fig.34 représente le modèle de notre système. Elle décrit de manière générale et simplifiée les divers éléments du diagramme de classes utilisé pour l'implémentation et donné en annexe (annexe A). Les principaux objets de notre système multi-agents sont les agents (bâtiment, groupe d'habitats et la commune) et leur environnement. L'environnement est représenté par les objets du milieu naturel (lac, rivière, forêt) et les objets du milieu bâti (route, autoroute, métro, station métro, train, station train).

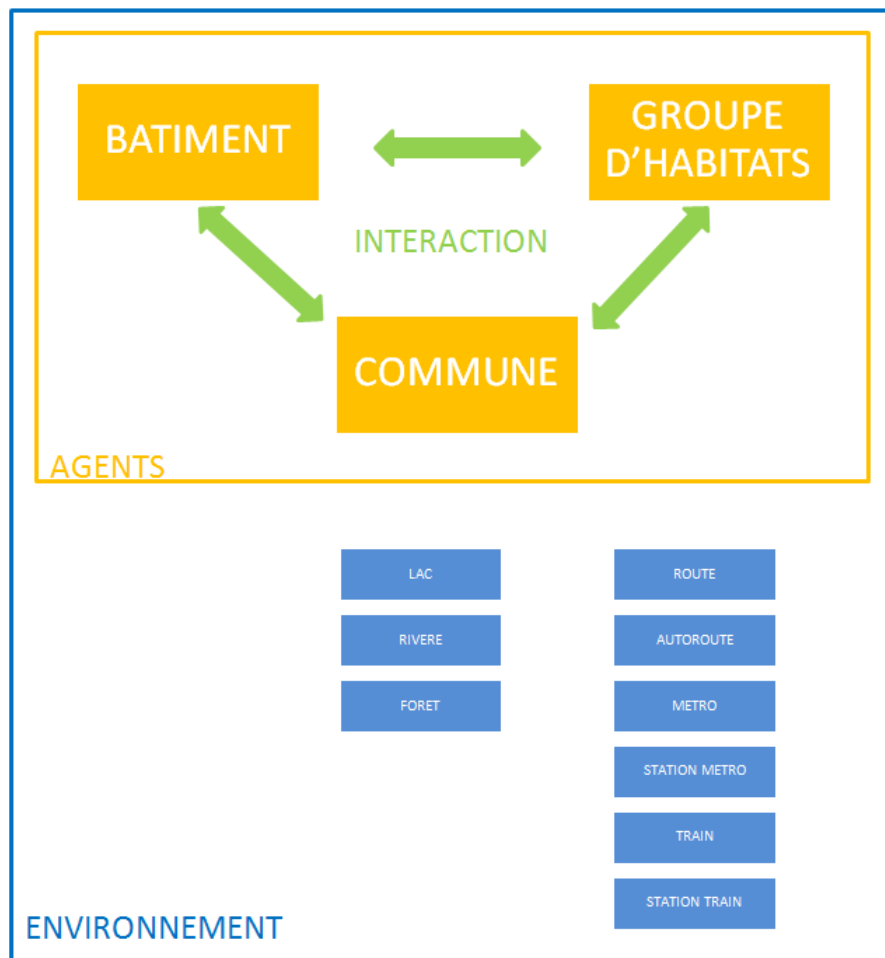


Figure 34: Principales composantes du système multi-agents

Les agents sont en interaction (communication) les uns avec les autres. En revanche ils ne communiquent pas avec les objets de l'environnement, car ces derniers ne sont pas considérés comme des agents. Néanmoins les agents perçoivent et sont influencés par les objets de l'environnement. On

## CHAPITRE 5 : CONCEPTION ET IMPLEMENTATION DU PROTOTYPE

### *Les quatre composantes du modèle de simulation multi-agents*

admet, dans ce premier prototype, que le système urbain et sa dynamique peuvent être décrits par l'interaction des agents (en relation avec leur environnement) montrés à la fig. 30.

La description précise des objets présentés à la fig. 30 est donnée en annexe (Annexe A.2).

### 5.3 Les quatre composantes du modèle de simulation multi-agents

D'un point de vue technique les propriétés d'un simulateur multi-agents sont liées en grande partie à l'architecture logicielle utilisée pour implémenter les agents et l'environnement dans lequel ils évoluent. La structure du modèle multi-agents est propre à notre cadre expérimental : celui de bâtiments évoluant dans le milieu urbain.

Il est important de structurer le modèle de simulation afin de lui offrir une modularité et une réutilisabilité ultérieure. Pour ce faire on se réfère à l'approche VOYELLES formulée par Yves Demazeau [Demazeau, 1995]. Le système multi-agents est ainsi conçu selon quatre dimensions dépendant étroitement les unes des autres (fig. 35):

- **Agent** : l'ensemble des règles comportementales de l'agent et son architecture.
- **Environnement** : les objets de l'environnement et la modélisation de sa dynamique endogène.
- **Interaction** : la communication par échange de messages (procédure de langage) et la négociation
- **Organisation** : la hiérarchisation du système, sa structuration en groupes (ensemble d'agents ayant une dynamique semblable à un agent unique) et la temporalité des actions.

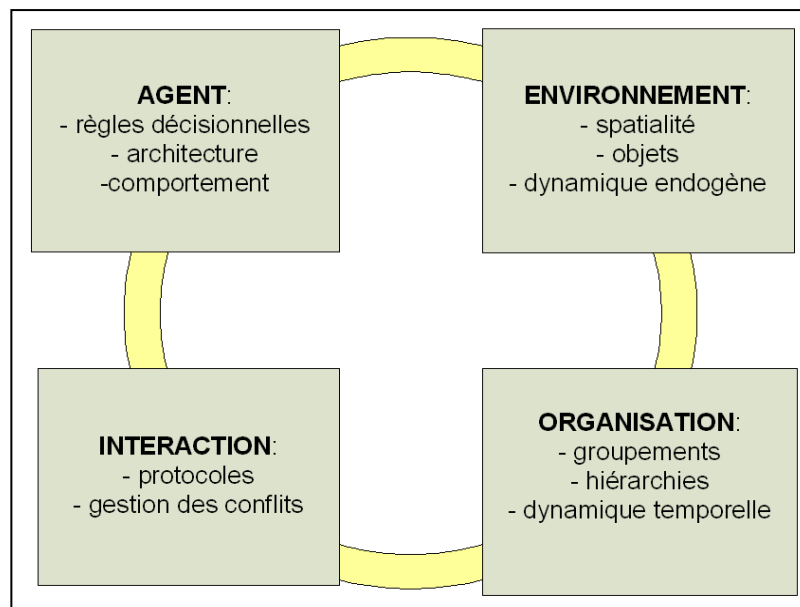


Figure 35: Les quatre composantes du modèle de simulation

## CHAPITRE 5 : CONCEPTION ET IMPLEMENTATION DU PROTOTYPE

*Les quatre composantes du modèle de simulation multi-agents*

### 5.3.1 Modélisation de l'environnement

Dans notre cas précis, l'environnement dans lequel évoluent les agents est un espace euclidien continu. Cet espace sera néanmoins discrétisé afin de permettre la localisation des bâtiments à créer. D'un point de vue géomatique, son système de référence géographique et de projection correspond au système national suisse. La dynamique endogène principale de l'environnement correspond à la croissance des bâtiments.

Les autres dynamiques endogènes de l'environnement telles que par exemple l'évolution des zones vertes ou encore des catastrophes naturelles ne sont pas considérées dans le cadre de ce premier prototype mais devraient l'être dans de possibles développements futurs.

Dans leur environnement, les agents vont percevoir et produire des influences tandis que les objets de l'environnement se contenteront de produire des influences dans un rayon déterminé.

### 5.3.2 Modélisation des agents

Les agents cognitifs de notre système sont les Bâtiments (de toutes sortes de fonctions), la Commune, et les Groupes d'Habitats. Les décisions qu'ils prennent sont ainsi motivées par des buts précis qui sont le reflet d'une perception et d'une représentation logique de leur environnement.

Ces agents sont basés sur une architecture BDI [Rao et Georgeff, 1995]. Il est à noter qu'un SMA modélisé en termes de composants *Croyances*, *Désirs* et *Intentions* n'est pas nécessairement conçu avec des structures identifiables de données correspondant à chacun de ces composants.

Une critique souvent faite à l'encontre de la conception BDI est qu'elle est notamment inappropriée pour certains systèmes qui doivent apprendre et adapter leur comportement. Cela ne nous concerne pas dans le cadre de notre thèse, car les agents considérés ne sont pas des agents possédant des capacités d'apprentissage.

Dans notre système les croyances des agents sont liées à leur perception de l'environnement et des autres agents. Le désir des agents (bâtiments, etc.) est de manière générale de maximaliser leur *Degré De Satisfaction*, d'être satisfaits de leur localisation de façon globale. Les intentions des agents sont liées à leurs règles comportementales : ainsi un agent bâtiment de type *logement* ne réagira pas de la même façon à une interaction avec d'autres agents qu'un agent bâtiment de type *hôtel*. Les règles comportementales des agents n'ont pas été définies de manière exhaustive dans cette première approche de modélisation. En effet cela nécessite tout un travail de recherche concernant tous les types de comportements attendus de tel ou tel type d'agent. Tous les types de comportement d'un agent (Bâtiment, Commune et Groupe d'Habitat) ne nous ont pas été fournis par les architectes, car eux-mêmes ne connaissaient pas de manière exhaustive le comportement de tel ou tel type d'objet du territoire participant à la morphogenèse urbaine.

Nous nous sommes limités dans cette première approche à quelques scénarios prédéterminés pour lesquels on avait défini à l'avance des comportements.

## CHAPITRE 5 : CONCEPTION ET IMPLEMENTATION DU PROTOTYPE

*Les quatre composantes du modèle de simulation multi-agents*

### a) Méthodes des agents

Chaque agent possède des méthodes propres qui lui permet d'interagir avec les autres agents et d'exécuter des actions.

Les agents dans le système possèdent les 2 types de méthodes suivantes :

a) Méthodes liées à l'interaction communes à tous les agents:

1. **SendMessageValue ()** : méthode pour envoyer un Message Valeur.
2. **ReadMessageValue ()** : méthode pour lire un Message Valeur.
3. **SendMessageAction ()** : méthode pour envoyer un Message Action.
4. **ReadMessageAction ()** : méthode pour lire un Message Action.

b) Méthodes liées à des processus comportementaux de l'agent :

Pour l'agent **Bâtiment** :

1. **M\_MAJage ()** : mise à jour de l'âge des bâtiments.
2. **M\_MAJds ()** : mise à jour du *Degré de Satisfaction*.

Pour l'agent **Commune** :

1. **M\_CreationBatiment ()** : méthode pour créer des bâtiments
2. **M\_CalculNbBatiment ()** : méthode pour calculer le nombre de bâtiments existant dans la commune
3. **M\_CalculNbLogements ()** : méthode pour calculer le nombre de logements existant dans la commune

Pour l'agent **Groupe** :

1. **M\_CreationEcoleGroupe ()** : méthode qui permet à un groupe de logements de demander à la commune la création d'une école.
2. **M\_DetEcGroupe ()** : méthode qui permet à un groupe de logements de détecter une école dans les environs.
3. **M\_Gpop ()** : méthode qui permet de calculer la population d'un groupe de logements.

Nous avons développé d'autres méthodes, notamment pour la localisation des bâtiments, mais elles ne sont pas présentées ici car elles sont déjà intégrées dans d'autres méthodes.

### b) Les agents dans le système urbain

Nous illustrons ci-dessous l'évolution des agents (*Bâtiment*, notamment) dans leur environnement (la ville) de façon conceptuelle (fig. 36).

## CHAPITRE 5 : CONCEPTION ET IMPLEMENTATION DU PROTOTYPE

### *Les quatre composantes du modèle de simulation multi-agents*

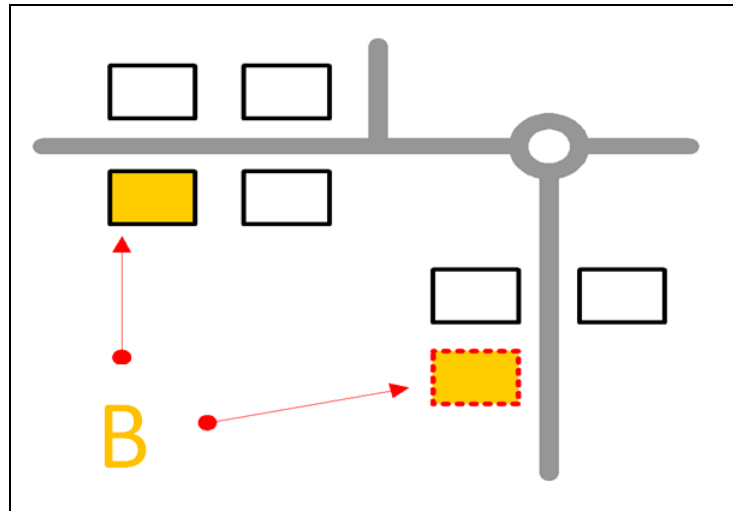


Figure 36: Agent cognitif évoluant dans le système urbain

Les **agents cognitifs** les plus nombreux du système sont les bâtiments tels qu'un bâtiment locatif, un bâtiment commercial, etc., ou un groupe de bâtiments identiques ou différents. Un bâtiment peut posséder une ou plusieurs fonctions (logement, commerce, etc.). Les autres éléments (route, forêt,...) font partie de l'**environnement** et ne sont pas considérés comme des agents. On ne considère pas non plus des agents réactifs.

De manière imagée on peut dire que les bâtiments « évoluent » dans l'environnement urbain en cherchant à satisfaire leurs « désirs ». La fig. 36 illustre le fait qu'un bâtiment (lettre B) peut choisir de se placer (se créer) selon son désir. Il peut choisir de s'implanter à l'endroit d'un bâtiment déjà existant, par la destruction de ce dernier (représenté par le carré de bordure noire) ou se créer à un autre endroit (carré de bordure rouge trait-tillé).

### **c) Groupes de bâtiments dans la métropole**

D'après [Park, 2009] on observe dans les métropoles actuelles la présence de structures géométriques régulières et symétriques dans l'habitat. Cela est le reflet d'une organisation spatiale basée sur des regroupements géométriques. Nous prenons en compte dans notre modèle les groupes d'habitat comme étant un acteur important dans la dynamique de la morphogenèse. Les groupes d'habitat sont pour cette raison également considérés comme des agents. Ces groupes d'habitat présentent une identité bien définie et les bâtiments qui les constituent ont des caractéristiques de forme géométrique similaires : distance entre bâtiments (répartition homogène dans l'espace), surface des bâtiments, complexité géométrique 2D et 3D, élongation, etc., sont de même type (fonction).

## CHAPITRE 5 : CONCEPTION ET IMPLEMENTATION DU PROTOTYPE

### Les quatre composantes du modèle de simulation multi-agents

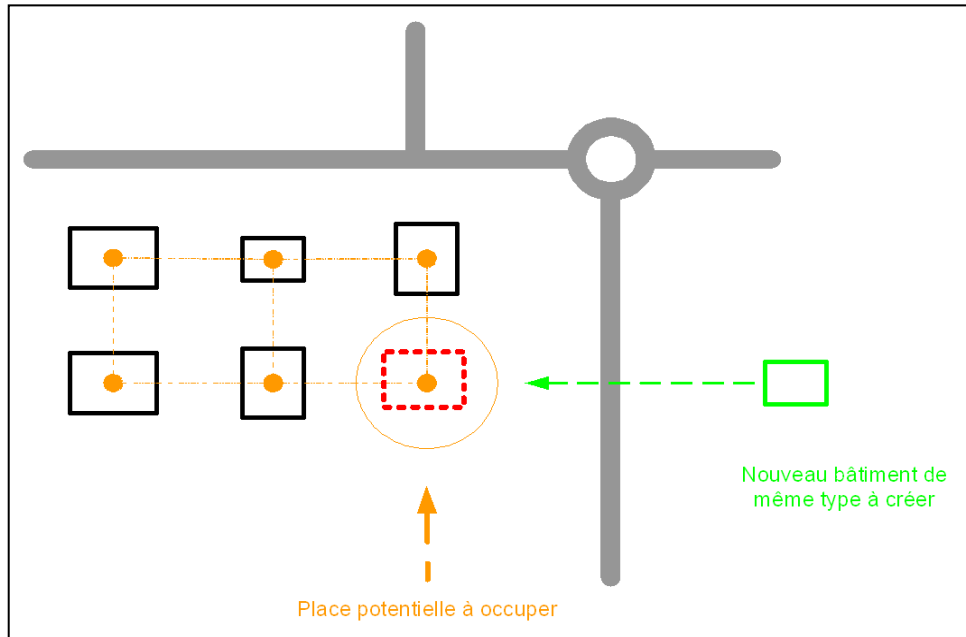


Figure 37: Attractivité d'un groupe de bâtiments: place d'occupation potentielle

Dans la métropole les bâtiments ont tendance à se grouper selon des formes présentant une certaine symétrie et une certaine régularité. Un nouveau bâtiment de même type désirant se créer aura tendance à se placer (avec une forte probabilité) à un endroit qui respecte la symétrie et l'« équilibre » du groupe de bâtiments existant (fig. 37).

### 5.3.3 Modélisation des interactions

On entend par interaction n'importe quelle action qui affecte l'agent dans la réalisation de ses désirs. Les agents ont une perception des objets de l'environnement et une perception des autres agents qui ne sont pas de même nature. Les agents interagissent donc avec leur environnement de deux manières différentes : de manière directe et de manière indirecte. La première est basée sur des messages échangés entre agents et la seconde sur la perception « passive » des informations provenant de l'environnement au moyen de capteurs. Les fondements de la communication directe qui nous concernent ici ont des sources multiples : linguistique, psychologie cognitive, théorie des actes de langage, etc.

Un agent est une entité indépendante dont la structure est connue de lui seul, par conséquent il ne peut pas agir directement sur un autre agent. Les agents interagissent les uns avec les autres par l'intermédiaire de messages car c'est le seul moyen pour eux de communiquer avec d'autres agents. La communication entre les agents apparaît comme un moyen de gérer l'interaction.

Pour pouvoir répondre aux exigences de modélisation décrites ci-dessus on a défini un modèle d'interaction entre les agents ainsi que des scénarios standard définis pour chaque type d'interaction. La modélisation de l'interaction requiert un certain formalisme et des protocoles, par conséquent un



## CHAPITRE 5 : CONCEPTION ET IMPLEMENTATION DU PROTOTYPE

### *Les quatre composantes du modèle de simulation multi-agents*

ensemble de méthodes et de classes associées a été développé. L'architecture des agents a été conçue afin de permettre la manipulation (envoi, réception et traitement) des messages échangés.

Le modèle d'interaction développé est un modèle ad-hoc adapté au problème étant donné qu'il n'existe pas de modèles génériques d'interaction entre les agents. Il existe des protocoles d'interaction tels que FIPA<sup>10</sup> mais ils ne sont pas utilisés étant donné leur degré de complexité. Quelques travaux de recherche concernant la standardisation des protocoles de communication dans les systèmes multi-agents ont été réalisés. Un article intéressant de Y. Labrou [Labrou, 2000] analyse notamment cet effort de standardisation.

La plupart du temps ces protocoles sont conçus afin de permettre la communication entre les agents qui n'ont pas été conçus par le même développeur et qui évoluent dans un environnement ouvert. Dans le cadre de notre recherche un langage d'interaction plus simple a été développé car les agents évoluent dans un environnement créé par un seul concepteur. Ce modèle d'interaction est largement inspiré de la thèse de Cécile Duchêne [Duchêne, 2004] du laboratoire COGIT (IGN, France) dont le thème principal est la conception d'un protocole de communication entre les agents dans le cadre de la généralisation cartographique.

On définit dans ce paragraphe un vocabulaire ainsi qu'une syntaxe pour la communication entre les agents.

#### **a) Les performatifs**

Un verbe performatif est un verbe dont l'utilisation constitue un acte en soi, se confondant avec l'acte d'énonciation. Les verbes performatifs sont utilisés dans les actes de langage qui sont définis comme un moyen mis en œuvre par un locuteur pour agir sur son environnement par l'intermédiaire de mots.

Afin de restreindre les ambiguïtés d'un message échangé entre les agents on utilise des performatifs. Les performatifs peuvent être de nature assertive (penser, informer, dire), directive (demander), déclarative (déclarer, ratifier), expressive (approuver), etc. Pour notre modèle multi-agents nous avons défini les performatifs suivants :

- **DemandeAction :**

C'est un performatif directif. L'agent expéditeur demande à l'agent destinataire d'exécuter une action. La syntaxe est la suivante : <nom\_action> [parametre]. L'agent peut demander à un autre agent de se détruire, de lui fournir une information concernant la valeur d'un de ses attributs, etc.

- **Informe :**

---

<sup>10</sup> FIPA : Acronyme de Foundation for Intelligent Physical Agents. FIPA est une organization qui promeut des standards liés aux technologies basées sur les systèmes multi-agents et l'interopérabilité de ces standards avec d'autres technologies.

## CHAPITRE 5 : CONCEPTION ET IMPLEMENTATION DU PROTOTYPE

### Les quatre composantes du modèle de simulation multi-agents

C'est un performatif assertif. L'agent expéditeur informe l'agent destinataire. La syntaxe est la suivante : <information> [parametre]. On peut informer sur un état, sur la valeur d'un attribut, sur le résultat d'une action, etc.

#### b) Scénarios standard

Nous définissons ici la sémantique du langage introduit ci-dessus. En nous basant sur les performatifs présentés, on définit pour notre système deux types de scénarios génériques :

- **Scénario de Demande d'Action** : dans ce cas l'Agent Expéditeur demande à l'Agent Destinataire de réaliser une action précise. Ce dernier teste s'il peut réaliser l'action en question et réalise l'action ou non. Ensuite il envoie un message à l'Agent Expéditeur pour lui communiquer la réussite ou l'échec de sa tentative (fig.38).

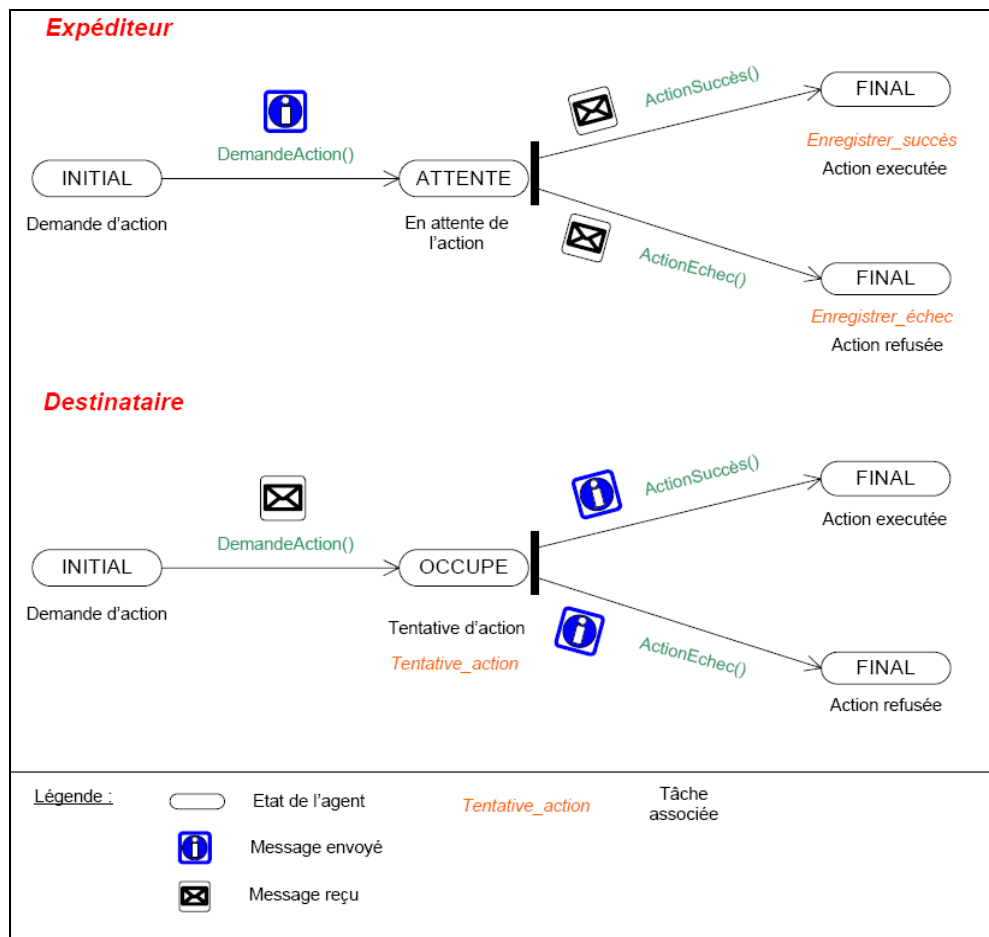


Figure 38: Graphes de transition jumelés pour le scénario Demande d'Action

## CHAPITRE 5 : CONCEPTION ET IMPLEMENTATION DU PROTOTYPE

### Les quatre composantes du modèle de simulation multi-agents

- **Scénario d'Envoi d'Information** : dans ce cas l'Agent Expéditeur transmet simplement une information (valeur d'un paramètre, etc.) à l'Agent Destinataire. Ce dernier enregistre l'information qui lui est transmise (fig.39).

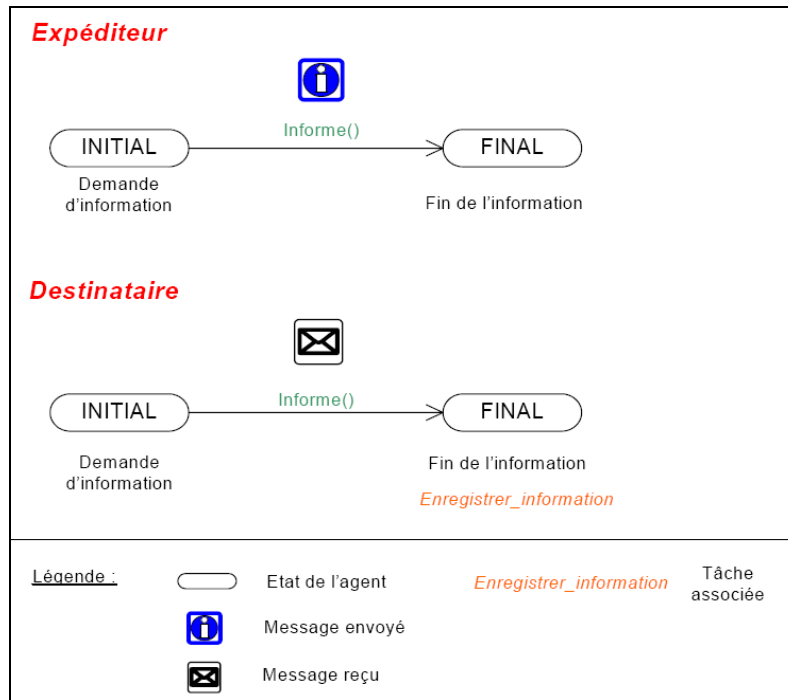


Figure 39: Graphes de transition jumelés pour le scénario Envoi d'Information

### c) Principes de négociation entre agents

De manière générale le but d'une négociation est d'instancier un contrat. L'initiateur dirige la conversation et demande des informations aux autres agents jusqu'à l'instanciation totale du contrat. Si cela s'avère impossible la négociation est annulée. Une fois que le contrat est pris il peut être modifié afin de satisfaire à d'autres contraintes. Cela induit des négociations en cascade. A ce stade de la recherche la négociation doit notamment respecter les caractéristiques suivantes :

- Les agents ont tous le même langage pour communiquer.
- Si une proposition de contrat n'est pas acceptée l'agent doit être capable de modifier d'autres contrats et de négocier la modification de contrats des autres interlocuteurs.
- Plusieurs négociations simultanées sont possibles.
- Certains contrats sont prioritaires par rapport à d'autres.
- Certains participants sont plus prioritaires que d'autres.
- La négociation ne doit pas se bloquer.

On fait appel à des graphes pour symboliser les diverses étapes d'une négociation.

### d) Modèle d'interaction

## CHAPITRE 5 : CONCEPTION ET IMPLEMENTATION DU PROTOTYPE

### Les quatre composantes du modèle de simulation multi-agents

Comme dit ci-dessus les agents sont conçus de telle façon qu'ils permettent l'envoi de messages et leur traitement. Les principales classes qui permettent la communication sont décrites à la fig. 40 La classe MV (pour *Message Valeur*) permet de stocker les messages de type informatif (*Scénario d'Envoi d'information*) tandis que la classe MA (pour *Message Action*) permet de stocker des messages de type demande d'action (*Scénario de Demande d'action*). Ce sont deux boîtes aux lettres de types différents.

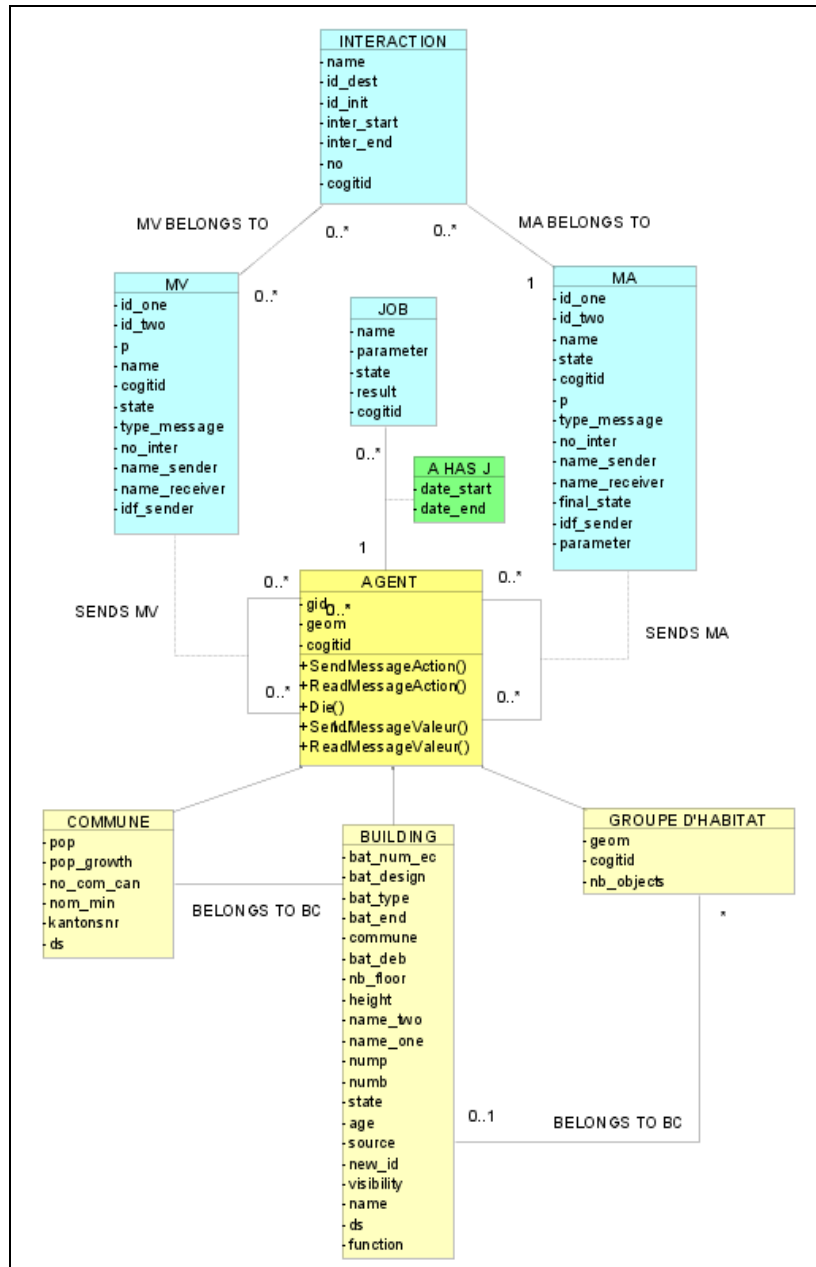


Figure 40: Diagramme UML du modèle d'interaction

Chaque message échangé est associé à une interaction : une instance *interaction* (de la classe *Interaction*) est ainsi créée à chaque initiation d'une conversation entre un ou plusieurs agents. Plusieurs agents peuvent participer à une même interaction. Chaque message échangé contient comme attribut le

## CHAPITRE 5 : CONCEPTION ET IMPLEMENTATION DU PROTOTYPE

### *Les quatre composantes du modèle de simulation multi-agents*

numéro d'interaction duquel il fait partie. Un agent *Bâtiment* peut aussi avoir une tâche en cours ou à réaliser représentée par la classe *Job*. Une tâche peut être une action à réaliser, un message à envoyer, etc. La transmission d'un message par un agent consiste en pratique pour l'agent *Expéditeur* à écrire dans la boîte aux lettres de l'agent *Destinataire* le contenu de son message.

#### **e) Méthodes des agents associées aux interactions**

Les agents possèdent notamment les méthodes suivantes pour gérer l'envoi et la réception de messages :

**SendMessageValue ()** : méthode pour envoyer un Message Valeur.

**SendMessageAction ()** : méthode pour envoyer un Message Action.

**ReadMessageValeur ()** : méthode pour lire un Message Valeur.

**ReadMessageAction ()** : méthode pour lire un Message Action.

#### **f) Exemple d'interaction simple**

On décrit dans ce paragraphe un exemple d'interaction simple entre l'agent Commune et l'agent Bâtiment. Les acteurs principaux dans la ville qui participent à la morphogenèse sont les agents. Ils peuvent être de plusieurs types. Leur comportement est principalement motivé par la satisfaction de leurs désirs de manière égoïste mais néanmoins contrainte par l'environnement. L'interaction entre un agent Commune et un agent Bâtiment peut se dérouler de la manière imagée suivante (on a choisi cette manière de présenter :

« L'agent Commune s'est rendu compte qu'il lui fallait des logements pour ses habitants. Une des possibilités (elle peut aussi créer directement des logements, la liste exhaustive des options pour ce cas particulier reste à définir par les architectes) qui s'offre à elle est de demander à une usine de se détruire.

COMMUNE (à l'Usine 1): J'aimerais que tu me fournisses la valeur de ton degré de satisfaction.

USINE 1 : 48.2

COMMUNE (à l'Usine 2): J'aimerais aussi que tu me fournisses la valeur de ton degré de satisfaction.

USINE 2 : 56.3

COMMUNE (à l'Usine n): J'aimerais aussi que tu me fournisses la valeur de ton degré de satisfaction.

USINE n : 22.7

COMMUNE : Dans tous ces DS il faut que je choisisse le plus mauvais et que je demande à l'usine qui me l'a envoyé de se détruire.

COMMUNE (à l'Usine choisie) : Peux-tu te détruire pour que je puisse construire un logement à la place ?

## CHAPITRE 5 : CONCEPTION ET IMPLEMENTATION DU PROTOTYPE

### Les quatre composantes du modèle de simulation multi-agents

USINE : Attends un moment je vais réfléchir...Est-ce que ta demande est recevable vis-à-vis de mes contraintes ? Mon DS est assez bas...mais je suis encore jeune...donc je ne peux pas accepter.

USINE (à la Commune) : Désolé mais tu vas devoir demander à quelqu'un d'autre...

COMMUNE : Ce n'est pas grave je vais essayer avec l'usine suivante ! »

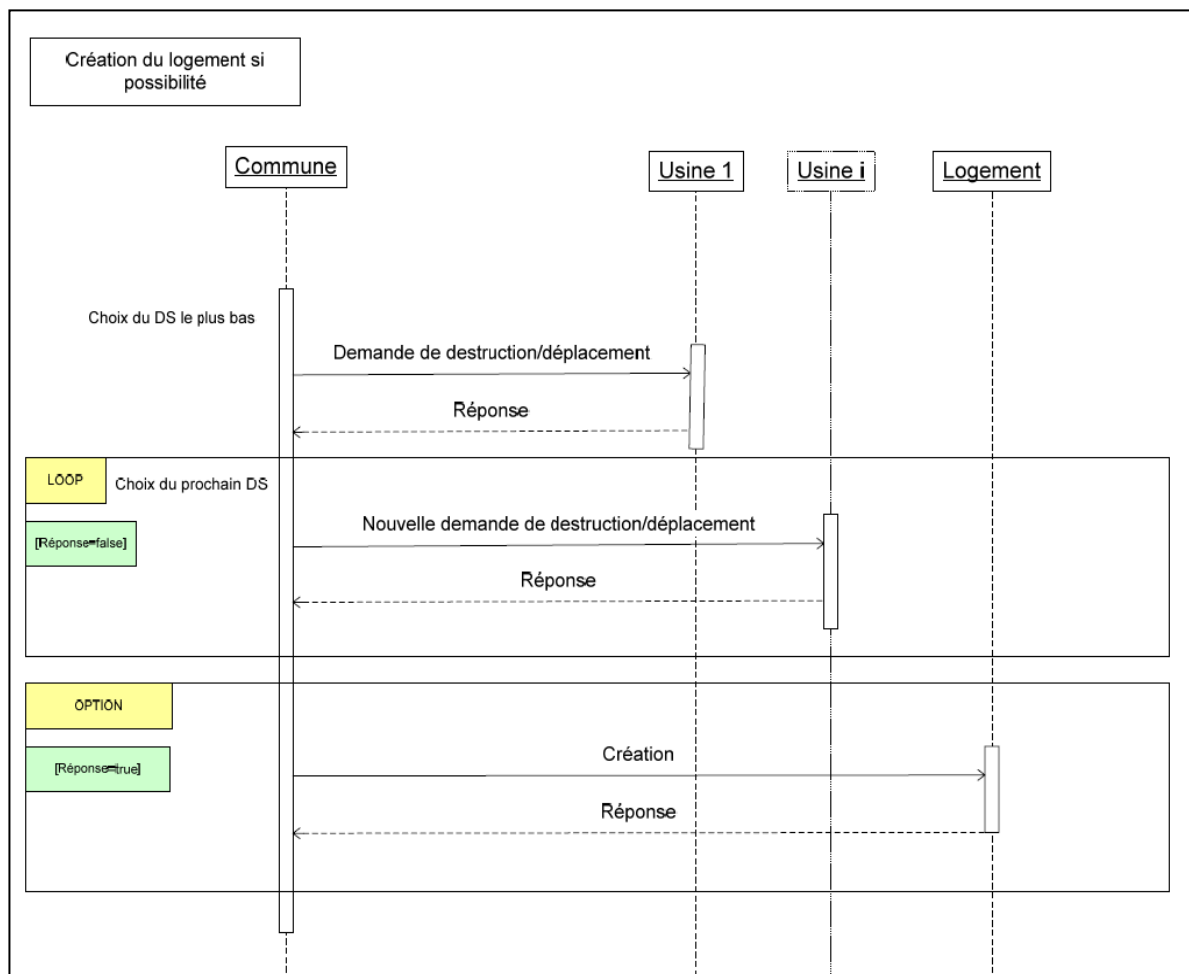


Figure 41: Diagramme UML des séquences

Les fins possibles sont :

- Après avoir essayé avec une autre usine la Commune peut enfin construire son logement
- Après avoir essayé avec une autre usine la Commune ne parvient pas à construire un logement et abandonne son idée. Elle peut alors choisir de créer un logement sans faire appel à une usine.

## CHAPITRE 5 : CONCEPTION ET IMPLEMENTATION DU PROTOTYPE

### *Les quatre composantes du modèle de simulation multi-agents*

L'interaction décrite ci-dessus peut se traduire par le schéma montré à la fig. 41. Après avoir sélectionné tous les *Degrés de Satisfaction* des usines la Commune adresse un message de façon itérative aux usines en commençant par le *Degré de Satisfaction* le plus bas. Dans cette boucle itérative, si elle obtient une réponse positive (Réponse=true) alors elle crée un logement.

### 5.3.4 Modélisation de l'organisation

#### a) La gestion du temps dans le système

Etant donné que les agents évoluent dans un environnement commun, ils doivent être soumis à une même loi temporelle afin de respecter le principe de causalité [Fyano et al, 1998]. Le processus décisionnel d'un agent est un processus discret car c'est un processus par événements. Les différents paramètres changent ainsi de façon instantanée.

Dans un système multi-agents, les processus de perception, de délibération et d'action des agents sont eux souvent effectués à un même instant T pour des raisons de simplicité (fig. 42).

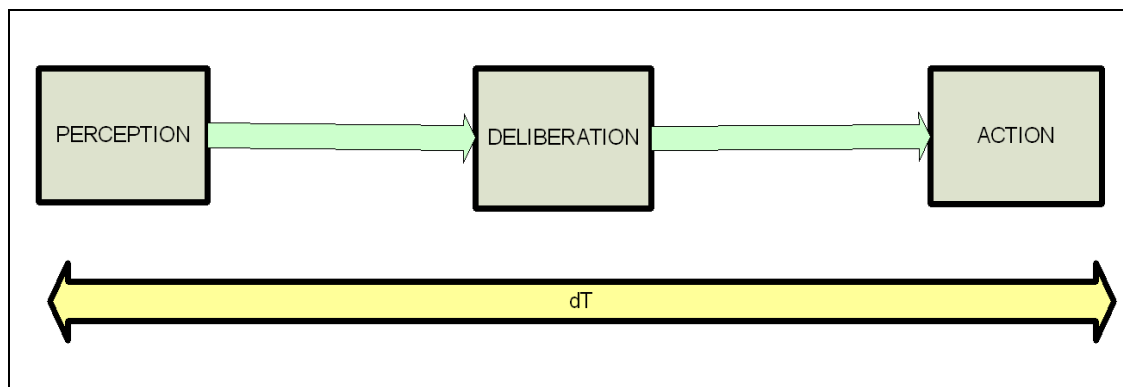


Figure 42: Perception, Délibération et Action sont souvent associées à un seul pas de temps

Dans d'autres cas il faut distinguer temporellement le processus de perception du processus de délibération. C'est notamment le cas lorsque l'agent dispose d'une boîte aux lettres et qu'elle contient des messages attendant d'être traités.

#### b) Simulation à pas de temps constant

La solution classique consiste à activer tous les agents à un instant donné t de façon séquentielle. Il s'agit d'un système à horloge : on passe d'un temps t à un temps t+1 (fig. 43). Les événements compris dans un même pas de temps sont considérés comme simultanés.

## CHAPITRE 5 : CONCEPTION ET IMPLEMENTATION DU PROTOTYPE

*Les quatre composantes du modèle de simulation multi-agents*

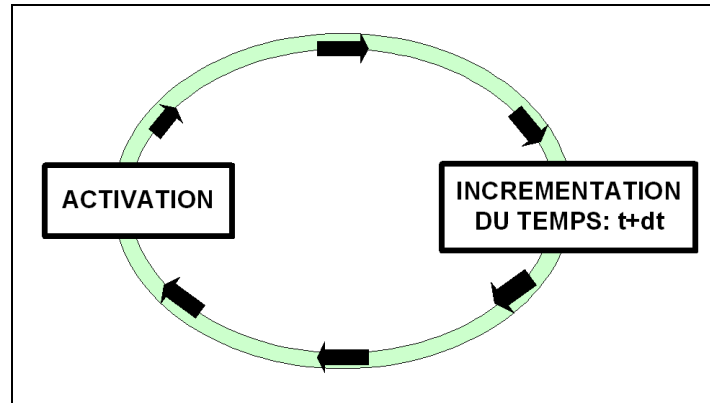


Figure 43 : Processus cyclique d'activation et d'incrémention temporelle

Le premier inconvénient de cette méthode est que l'ordre d'activation des agents a un impact sur le résultat de la simulation. La solution consiste à mélanger aléatoirement la liste des agents à activer. Le deuxième inconvénient vient de la perception du monde : un agent qui s'active en premier n'a pas la même perception du monde que celui qui s'active en deuxième position. En effet l'environnement aura changé entre temps par l'action du premier agent. Pour résoudre ce problème on peut utiliser une mémoire tampon [Travers 1996]. Ainsi les agents auront la même perception du monde lorsqu'ils auront à effectuer une action donnée (fig.44).

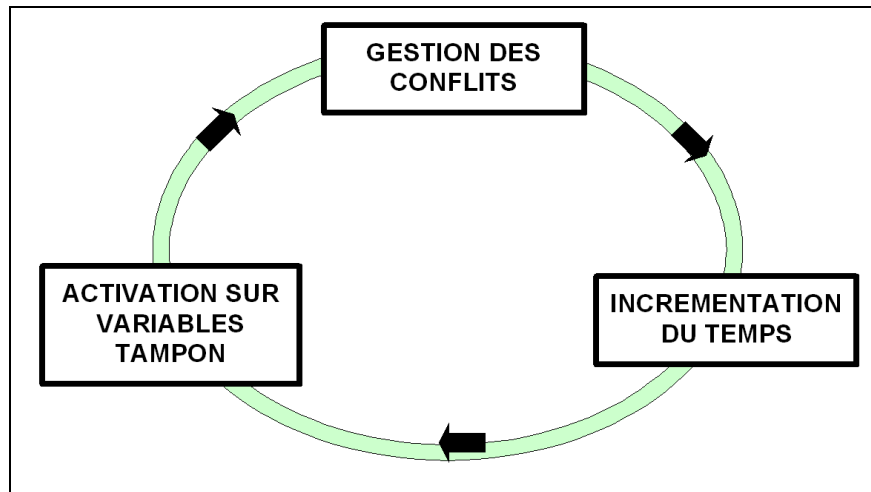


Figure 44: Processus cyclique d'activation et d'incrémention temporelle avec mémoire tampon et gestion des conflits

Les conflits peuvent être résolus en choisissant aléatoirement l'agent qui aura la priorité d'agir.

### c) Simulation par événements

Une société artificielle est mieux modélisée par une simulation par événements car les décisions sont rarement prises de façon simultanée dans la réalité [Lawson & Park, 2000]. Le principe consiste en une liste de tâches à accomplir.



## CHAPITRE 5 : CONCEPTION ET IMPLEMENTATION DU PROTOTYPE

### *Algorithmes de détection de groupes urbains*

#### d) **Choix de simulation : par événements et à pas de temps constant**

Pour notre simulation nous avons choisi une simulation par événements et selon un pas de temps constant. A chaque pas de temps on active l'ensemble des agents selon un ordre choisi aléatoirement et certaines de leurs actions si les seuils d'activation sont atteints. On règle les conflits en choisissant aléatoirement l'agent prioritaire (fig.44).

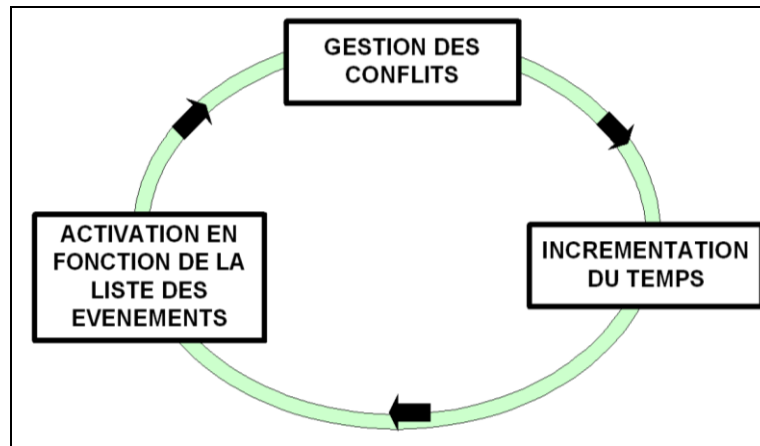


Figure 45: Processus cyclique d'activation événementielle et d'incrémention temporelle avec gestion des conflits

L'application pratique de ce choix de simulation est montrée au chap.6 dans le cadre de la présentation des scénarios de simulation.

## 5.4 Algorithmes de détection de groupes urbains

Afin de valider notre simulateur on a détecté des formes d'organisation dans l'espace urbain et notamment les figures produites par la formation des Groupes d'Habitats. On a par conséquent développé une méthodologie de détection et de représentation de groupes urbains [Plazenet, 2009], [Carneiro et al, 2009] qu'il est essentiel de montrer dans ce paragraphe. Cette méthodologie nous servira ensuite à valider notre simulateur. On a enrichi notre base de données et on a créé une bibliothèque d'algorithmes Java. La méthode de détection est basée sur les indicateurs morphologiques des bâtiments et la distance entre eux.

#### a) **Indicateurs morphologiques des bâtiments**

Chaque bâtiment a ses propres caractéristiques morphologiques. Ainsi afin de détecter les Groupes d'Habitats on considère les caractéristiques suivantes des bâtiments:

- **Orientation;**
- **Elongation** = longueur / largeur; valeur entre 0 and 1 (1: carré,  $0 < \text{rectangle} \leq 1$ );
- **Surface** (m<sup>2</sup>);
- **Complexité 2D** : nombre de points composant la forme de chaque surface ;

## CHAPITRE 5 : CONCEPTION ET IMPLEMENTATION DU PROTOTYPE

### Algorithmes de détection de groupes urbains

- **Complexité 3D** : nombre de surfaces composant le volume, dérivées de l'analyse de données LIDAR ;
- **Volume 3D approché** (m3) : surface x volume, la surface est dérivée des résultats de la simulation et la hauteur est dérivée du nombre d'étages de chaque bâtiment multiplié par 3 (considéré comme étant la hauteur moyenne, en mètres, pour chaque étage de bâtiment).
- **Volume 3D précis** (m3) : dérivé d'une approche hybride utilisant des données SIG et des données LIDAR.
- **Type de toit** : résultat de l'analyse des données LIDAR.
- **Pente moyenne du toit** (en degrés) : données de sortie de l'analyse des données LIDAR.

Les caractéristiques morphologiques qui nous permettent de détecter des groupes de bâtiments sont montrées à la fig. 46.

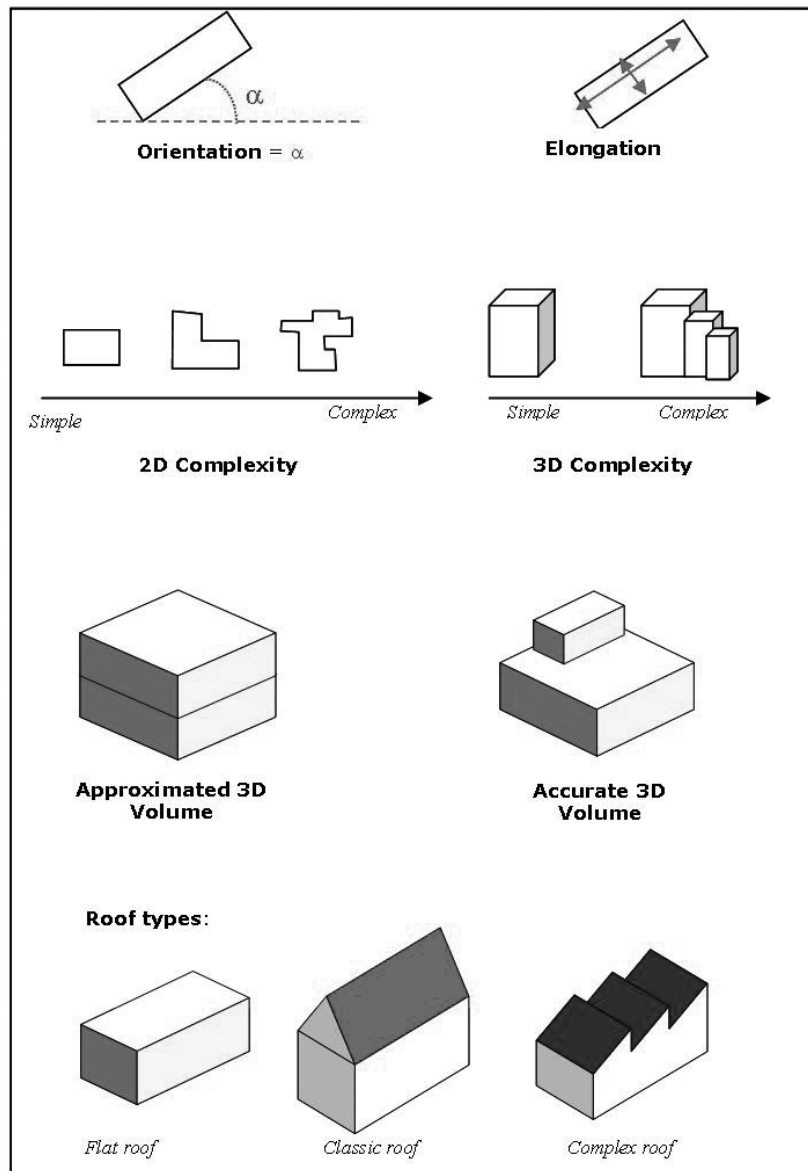


Figure 46: Indicateurs morphologiques des bâtiments [Plazanet, 2009]

## CHAPITRE 5 : CONCEPTION ET IMPLEMENTATION DU PROTOTYPE

### Algorithmes de détection de groupes urbains

#### b) Détection des groupes de logements en utilisant une base de données avec des algorithmes géomatiques

On introduit un nouvel élément au niveau méso: le Groupe d'Habitats. Ce groupe est défini comme un ensemble de bâtiments de même type possédant une même identité, avec une distribution homogène, une forme géométrique 2D similaire, la même complexité, la même élongation, etc.

L'objet géographique Groupe d'Habitats est associé à la classe Java *Groupe* dans notre prototype. La classe *Groupe* possède notamment les attributs suivants :

- géométrie 2D correspondant à l'enveloppe convexe des bâtiments agrégés.
- type (résidentiel, industriel, etc.).
- nombre de composants.
- indicateur de forme pour chaque bâtiment composant le groupe :
  - Orientation ;
  - Elongation ;
  - Complexité 2D ;
  - Surface ;
  - Volume 3D estimé ;
  - Complexité 3D ;
  - Volume 3D précis ;
  - Pente moyenne du toit ;

Ainsi afin de détecter les Groupes d'Habitat, on a ajouté une classe *Groupe* et une classe *Link* au modèle conceptuel (fig.47). La classe *Link* représente les liens entre les bâtiments qui nous permettront par la suite de définir les Groupes d'Habitats.

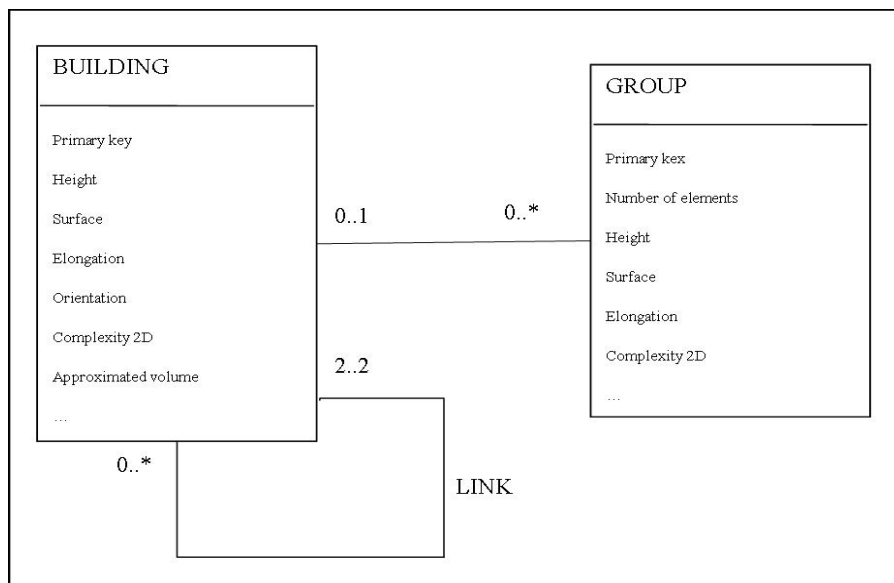


Figure 47: Modèle UML avec la classe *Group* et la classe d'association *Link*

## CHAPITRE 5 : CONCEPTION ET IMPLEMENTATION DU PROTOTYPE

### Algorithmes de détection de groupes urbains

La méthode de détection des *Groupes d'Habitats* établie ici est exécutée suivant trois critères : programmation, voisinage et forme des bâtiments. C'est une procédure en quatre étapes :

1. Calcul des descripteurs de forme pour chaque bâtiment ;
2. Détection des liens entre bâtiments et voisins ;  
Pour chaque bâtiment les descripteurs suivants sont calculés :
  - Complexité 2D ;
  - Surface ;
  - Orientation ;
  - Elongation ;
  - Volume approché 3D ;
3. Création des groupes suivant les liens détectés ;
4. Regroupement spatial suivant les angles entre les liens ;

Ensuite une détection des liens est effectuée comme suit :

- Calcul du centre de gravité pour chaque bâtiment en considérant sa géométrie 2D ;
- Recherche du centre de gravité de chaque bâtiment dans un buffer dont le diamètre dépend de la hauteur du bâtiment et de la densité urbaine de la ville sur laquelle il est situé (fig. 48).

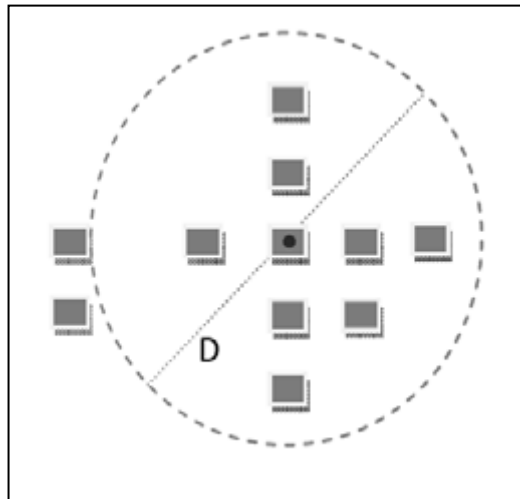


Figure 48: Recherche des centres de gravité

$D = p * (1 - d) * h$ , où :

D: diamètre du buffer;

P: paramètre dépendant de la hauteur du bâtiment

d : densité de la commune

## CHAPITRE 5 : CONCEPTION ET IMPLEMENTATION DU PROTOTYPE

### *Algorithmes de détection de groupes urbains*

Pour chaque centre de gravité trouvé à l'intérieur du buffer on vérifie la similarité avec chaque bâtiment suivant des descripteurs morphologiques (fig. 49).

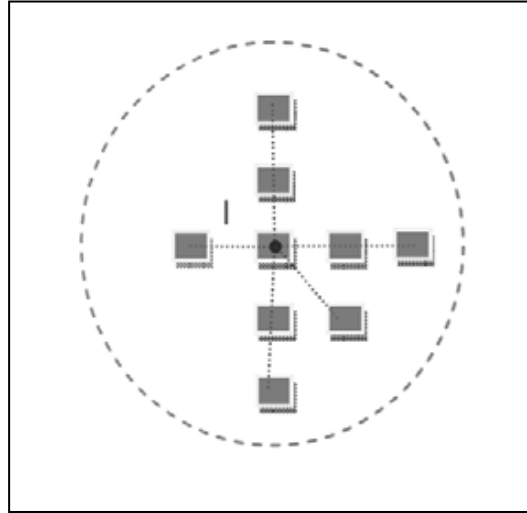


Figure 49: Vérification de la similarité des bâtiments

Pour chaque lien  $l$  (les valeurs présentées ci-dessous sont empiriquement déterminées et représentent le degré de similarité entre les descripteurs) :

- la différence de hauteur (descripteur 1) doit être inférieure à 7 mètres (ce qui représente une différence de 2 étages);
- le ratio entre les surfaces au sol des bâtiments (descripteur 4) qui représente le rapport entre les surfaces des bâtiments doit être inférieur à 0.5 ;
- le ratio entre les volumes totaux des bâtiments (descripteur 2) qui représente le rapport entre les volumes totaux des bâtiments doit être inférieur à 0.5.
- le ratio de la complexité des bâtiments (un des trois descripteurs de complexité : descripteur 9, descripteur 10 ou descripteur 11), représentant le rapport entre les complexités des bâtiments, doit être inférieur à 0.5.
- le type de toit (descripteur 8) doit être le même.

Les liens sont stockés dans la table des liens, tel que présenté à la fig. 47. Finalement la création des groupes avec les liens détectés est appliquée de la façon suivante :

- les groupes sont stockés dans la table *groupe* ;
- les groupes sont supprimés si un bâtiment composant le groupe appartient déjà à un groupe.
- le nombre d'éléments de chaque groupe est mis-à-jour.

## **CHAPITRE 5 : CONCEPTION ET IMPLEMENTATION DU PROTOTYPE**

### *Algorithmes de détection de groupes urbains*

- la géométrie de chaque groupe qui correspond au barycentre de tous les barycentres des bâtiments qui composent le groupe est calculée.

## CHAPITRE 6 :

### SIMULATIONS ET VALIDATION

*Ce chapitre présente la validation du simulateur à l'échelle micro et à l'échelle méso en se basant sur des scénarios d'interaction prédéfinis. Il montre également l'importance d'utiliser une approche multi-échelles et présente les algorithmes développés permettant de détecter les formes produites par les groupes d'habitat.*

#### 6.1 Introduction

Afin de valider notre prototype nous avons effectué des études de cas intégrant des simulations. Un simulateur peut être considéré comme valide s'il est acceptable pour l'usage que l'on veut en faire [Rykiel, 1996]. Il s'agit de déterminer les critères de validation. Ils doivent être clairement explicités et les données simulées doivent être comparées avec les données observées.

Dans le cadre de cette validation nous nous sommes focalisés dans un premier temps sur l'échelle micro et dans un deuxième temps sur l'échelle méso, étant donné que les problématiques abordées dans la thèse de J.-J. Park [Park, 2009] concernent essentiellement la symétrie des groupements urbains.

Dans ce cadre de validation, il s'agit avant tout de déterminer la pertinence de notre prototype de simulation par rapport aux critères suivants (ces critères ont été définis en accord avec les chercheurs travaillant sur le projet):

1. **Le prototype doit permettre une représentation géométrique des objets urbains et de leur dynamique qui soit utile et exploitable à l'échelle micro et méso (dans un premier temps):** notamment on doit pouvoir vérifier les hypothèses sur la morphogenèse urbaine et la formation des groupes.
2. **Le prototype doit être extensible<sup>11</sup>** : un changement ou un ajout dans les lois de morphogenèse doit pouvoir être facilement intégrable dans le prototype sans devoir lui apporter des modifications majeures.

---

<sup>11</sup> Dans le domaine du génie logiciel l'*extensibilité* se réfère à la propriété d'un système qui peut à être agrandi sans difficultés.

## CHAPITRE 6 : SIMULATIONS ET VALIDATION

### *Validation des résultats de simulation à l'échelle micro*

Les études que nous avons réalisées sont relativement limitées étant donné le temps à disposition et les scénarios fournis, mais elles offrent un aperçu global du fonctionnement du simulateur. Nous reviendrons sur les limitations mentionnées ci-dessus dans le cadre de la conclusion de cette thèse.

## 6.2 Validation des résultats de simulation à l'échelle micro

Avant d'aborder la validation des résultats (création de formes) à l'échelle méso, nous présentons ici des simulations impliquant des résultats à l'échelle micro. Les résultats d'une simulation sont considérés comme valides à l'échelle micro dans la mesure où un bâtiment créé se place à un endroit donné qui est proche de la réalité observée. En outre ces simulations vont nous permettre de conclure qu'une validation se limitant à l'analyse de la création de formes à l'échelle micro n'est pas pertinente. Néanmoins les processus se déroulant à l'échelle micro sont importants à analyser car ils participent à la création des formes à l'échelle méso.

### 6.2.1 Simulations par agents vecteurs multi-échelles

Les simulations réalisées avec le prototype ont été modélisées sous forme de scénarios. Ce sont des scénarios d'interaction prédéfinis entre les agents. Ils décrivent les actions des agents en fonction du temps et montrent leur manière de fonctionner. L'intérêt d'utiliser un scénario est de montrer la manière dont les agents interagissent dans des situations déterminées et comment cette interaction participe à la dynamique urbaine.

Les scénarios à disposition nous ont été fournis par les chercheurs travaillant sur le projet et ensuite formalisés tel que présenté ci-dessous.

#### **a) Scénario 1 : création d'une école secondaire dans une commune suite à la demande d'un groupe de logements**

Ce scénario montre l'interaction multi-échelles d'objets micro (école) et d'objets macro (commune). Il a pour but de montrer l'importance des processus multi-échelles dans la dynamique urbaine. Les résultats sont évalués à une échelle micro.

##### 1. Description conceptuelle du scénario :

Un Groupe d'Habitats (échelle méso) souhaite se créer à un endroit précis dans la commune (échelle macro) (fig. 50).



## CHAPITRE 6 : SIMULATIONS ET VALIDATION

### Validation des résultats de simulation à l'échelle micro

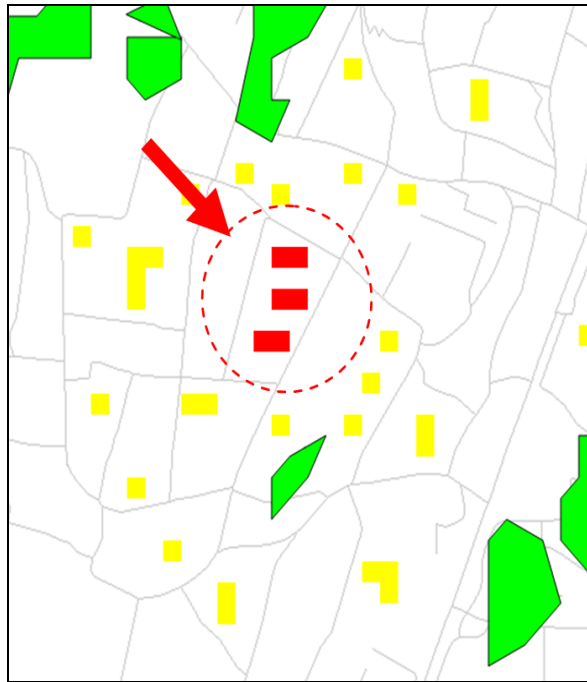


Figure 50: Groupe de logements souhaitant se créer dans une Commune

Il doit déterminer s'il existe une école (échelle micro) à proximité. L'agent Groupe doit donc détecter dans un rayon donné (rayon de perception de l'agent) la présence éventuelle d'une école secondaire (fig. 51).

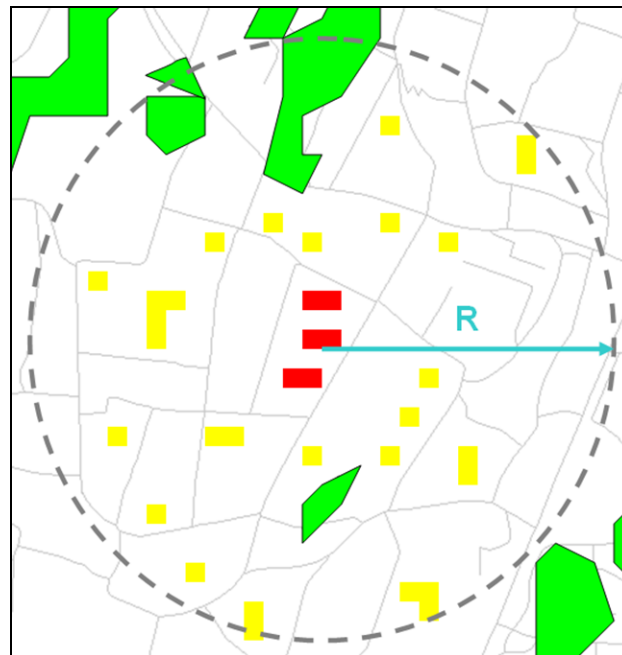


Figure 51: Rayon de déplacement (R) pour un écolier du groupe de logements vers une école secondaire

## CHAPITRE 6 : SIMULATIONS ET VALIDATION

### Validation des résultats de simulation à l'échelle micro

Deux solutions sont alors possibles :

1. Il n'y a pas d'école secondaire dans le rayon donné. L'agent Groupe demande à la Commune la création d'une nouvelle école (fig. 52).

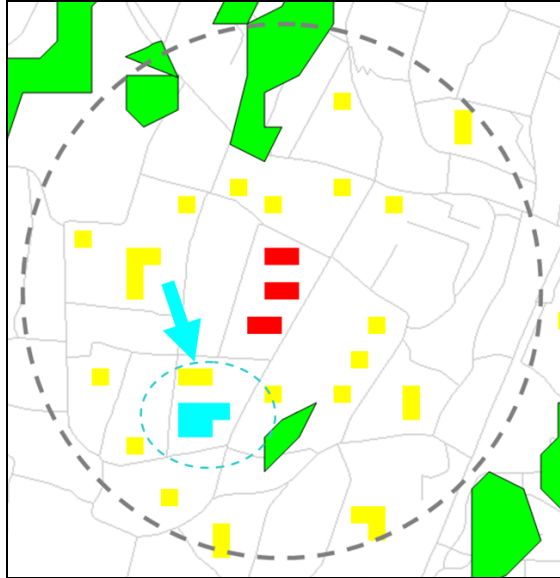


Figure 52: Création d'une école secondaire par la Commune

2. Il y a une école secondaire à proximité (fig. 53). L'agent Groupe fournit à l'agent Commune l'identité de l'école en question et la commune entre alors en interaction avec l'agent Bâtiment de type école.

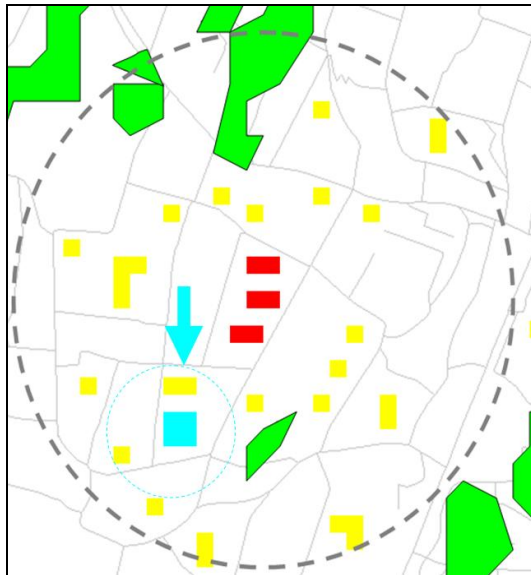


Figure 53: Présence d'une école secondaire dans le rayon

## CHAPITRE 6 : SIMULATIONS ET VALIDATION

### Validation des résultats de simulation à l'échelle micro

Deux cas doivent alors être considérés:

1. L'École répond à la Commune qu'elle peut accueillir de nouveaux élèves. Il n'y a donc pas de nouvelles décisions à prendre et l'interaction se termine à ce moment-là.
2. L'École ne peut pas accueillir de nouveaux élèves et on a les cas suivants :
  - L'École accepte et peut s'agrandir (fig. 54)

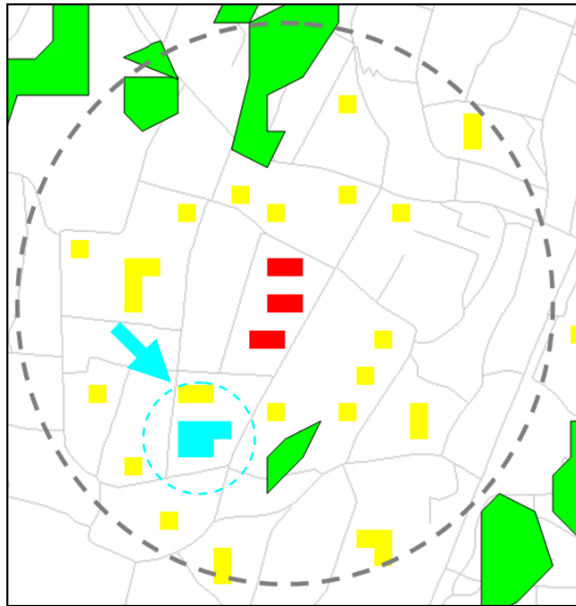


Figure 54: Agrandissement de l'école secondaire

- L'École refuse ou ne peut pas s'agrandir. Une nouvelle Ecole est créée par la Commune (fig. 55).

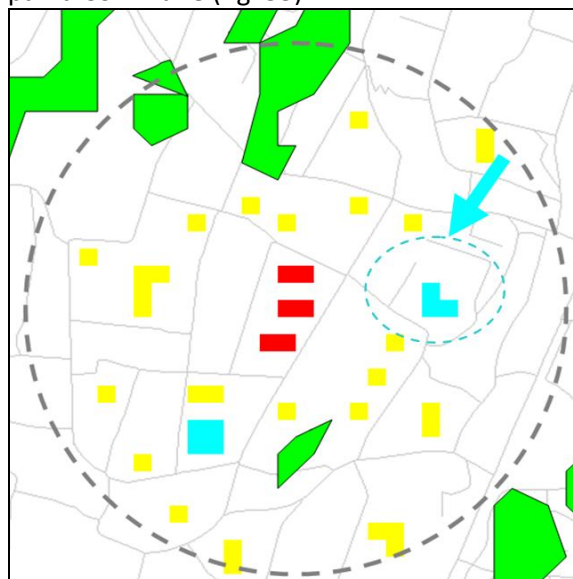


Figure 55: Création d'une nouvelle école secondaire par la commune

## CHAPITRE 6 : SIMULATIONS ET VALIDATION

### Validation des résultats de simulation à l'échelle micro

#### 2. Modélisation UML du processus d'interaction :

De manière plus formelle (qui puisse être réutilisée par d'éventuels futurs développeurs) nous présentons à la fig. 56 le diagramme des séquences UML concernant l'interaction pour le scénario décrit ci-dessus entre les trois types d'agents que sont le Groupe d'Habitats, la Commune et les Bâtiments de type école. Seul le cas no 2 (celui où il existe au moins une école à proximité) est présenté.

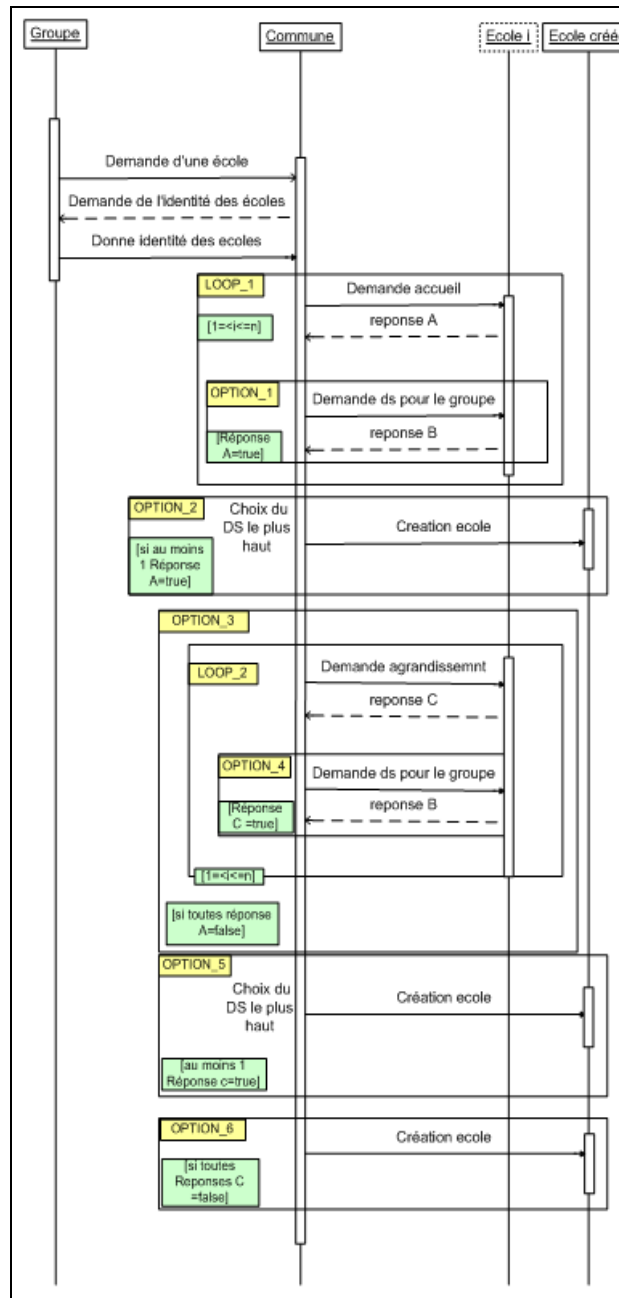


Figure 56: Schéma des séquences concernant la création d'une nouvelle école secondaire

## CHAPITRE 6 : SIMULATIONS ET VALIDATION

### Validation des résultats de simulation à l'échelle micro

#### 3. Résultats de la simulation et validation du scénario:

Le contexte de la simulation se situe dans la commune de Chavannes-Près-Renens près de Lausanne dans les années 70. Pour répondre à la croissance de la population et faire face à l'augmentation du nombre d'écoliers qui s'en suit, la commune de Chavannes-Près-Renens décide de créer une nouvelle école secondaire dans les années 70.

On a réalisé deux types de simulations différentes : dans un premier temps en fonction du *Degré de Satisfaction* uniquement sans interactions multi-échelles et dans un deuxième temps par systèmes multi-agents. Ensuite on les a comparées à la réalité observée suivant des critères d'emplacement spatial.

La situation du point de vue du développement urbain en 1971 est présentée à la fig. 57. On peut remarquer que 4 écoles secondaires et 2 bâtiments universitaires se trouvent dans la zone d'étude. Il est à noter que les 2 bâtiments universitaires n'interviennent pas dans le processus de simulation, seules les 4 écoles secondaires sont déterminantes.

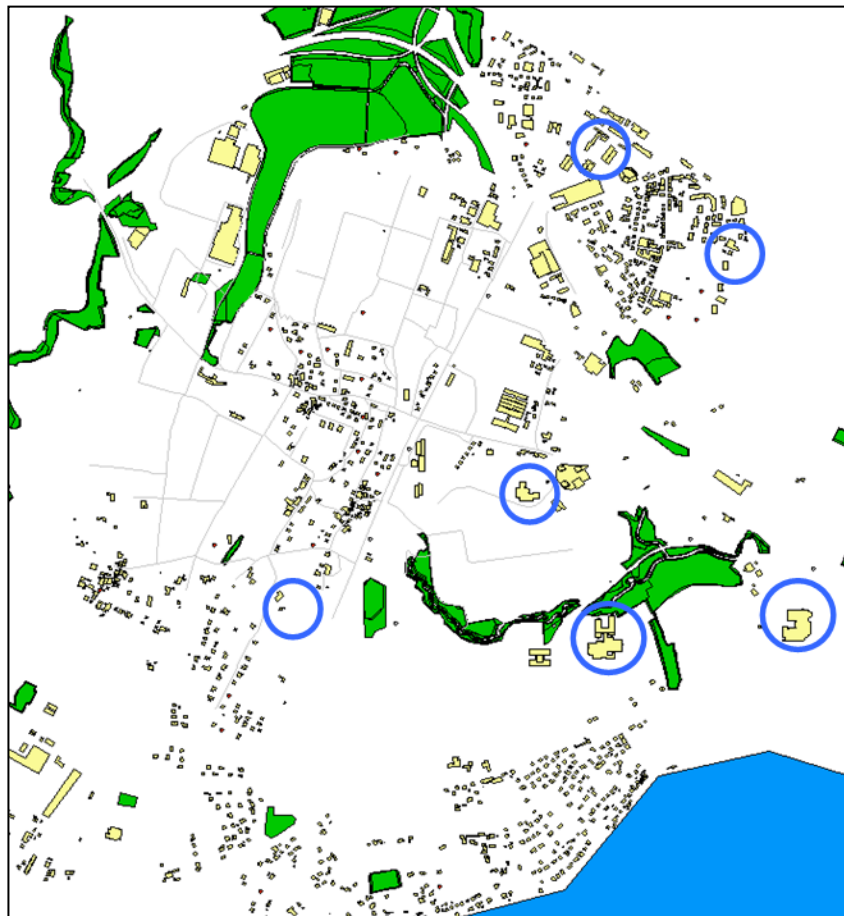


Figure 57: Développement urbain réel de la zone de Chavannes-Près-Renens en 1971 avec les 4 écoles secondaires et les 2 bâtiments universitaires

## CHAPITRE 6 : SIMULATIONS ET VALIDATION

### Validation des résultats de simulation à l'échelle micro

#### 4. Simulation en fonction du DS :

En fonction du développement urbain en 1971 on simule la création d'une nouvelle école d'après le calcul du *Degré de Satisfaction* (DS) des agents. La simulation se base uniquement sur le *Degré de Satisfaction* sans considérer une interaction entre les agents Commune, Groupe d'Habitats et Ecole. On lance simplement dans le simulateur la création d'une nouvelle école dans la zone d'étude et elle se placera au mieux dans le territoire en fonction de son DS. Il n'y a donc pas de communication entre des agents ni de négociation. Les seuls critères pris en compte sont les critères de proximité. Les résultats de la première simulation sont donnés à la fig. 58.

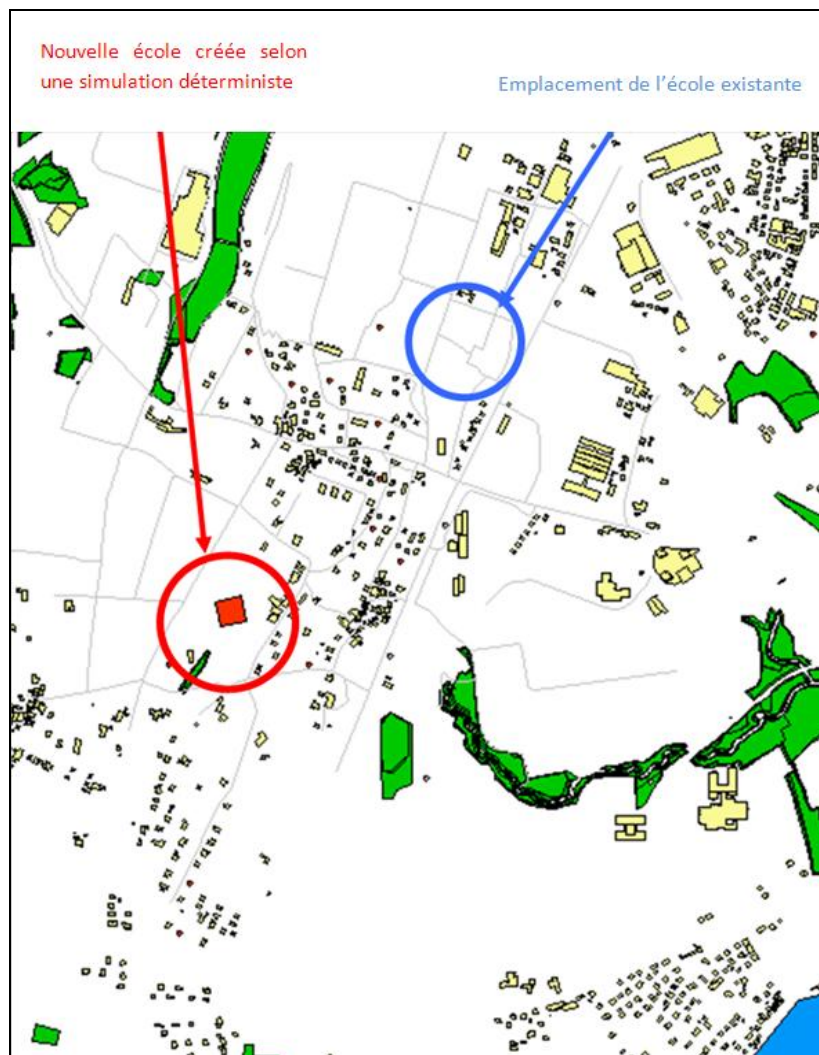


Figure 58: Résultat de la simulation déterministe

On peut observer que la nouvelle école se place assez loin de l'école réelle (à 800 mètres environ).

## CHAPITRE 6 : SIMULATIONS ET VALIDATION

### *Validation des résultats de simulation à l'échelle micro*

#### 5. Simulation par agents vecteurs multi-échelles :

On va maintenant utiliser une approche par agents vecteurs multi-échelles en faisant intervenir des agents communicants. Dans le même contexte que précédemment, on considère les bâtiments de logements voulant se créer dans la commune comme des agents Groupe d'Habitats. Ces groupes sont des agents et sont donc dotés de capacités cognitives. Un groupe de logements se compose en principe de 300 habitants (valeur donnée par les architectes) dont une partie est composée d'enfants d'âge scolaire (des collégiens dans le cas considéré ici). Ces élèves ont donc besoin d'une école à proximité qui puisse les accueillir. La commune dispose de plusieurs écoles (cf.fig. 57). Le Groupe d'Habitats doit demander à la Commune si elle possède une école qui puisse intégrer ses nouveaux élèves. La Commune doit d'abord déterminer quelle est l'école la plus proche du groupe de logements et ensuite vérifier s'il y reste de la place. Si tel n'est pas le cas alors elle demande à son école suivante (dans la mesure où cette dernière ne se trouve pas trop loin du groupe) s'il lui reste de la place. Si la Commune ne parvient pas à placer les nouveaux élèves dans une école quelconque alors elle est obligée d'en créer une nouvelle (c'est ce dernier cas qui sera considéré ici).

Pour les besoins de la démonstration on fait une simulation avec plusieurs groupes qui doivent se créer dans les années 70 (fig. 59). En effet on n'avait pas à disposition dans notre base de données un groupe de 300 habitants qui devait se créer dans cette zone à cette période-là, on a donc été contraint de lancer plusieurs fois la simulation avec des petits groupes pour aboutir à un emplacement moyen. Cette approche est discutable et nous y reviendrons.

## CHAPITRE 6 : SIMULATIONS ET VALIDATION

### Validation des résultats de simulation à l'échelle micro

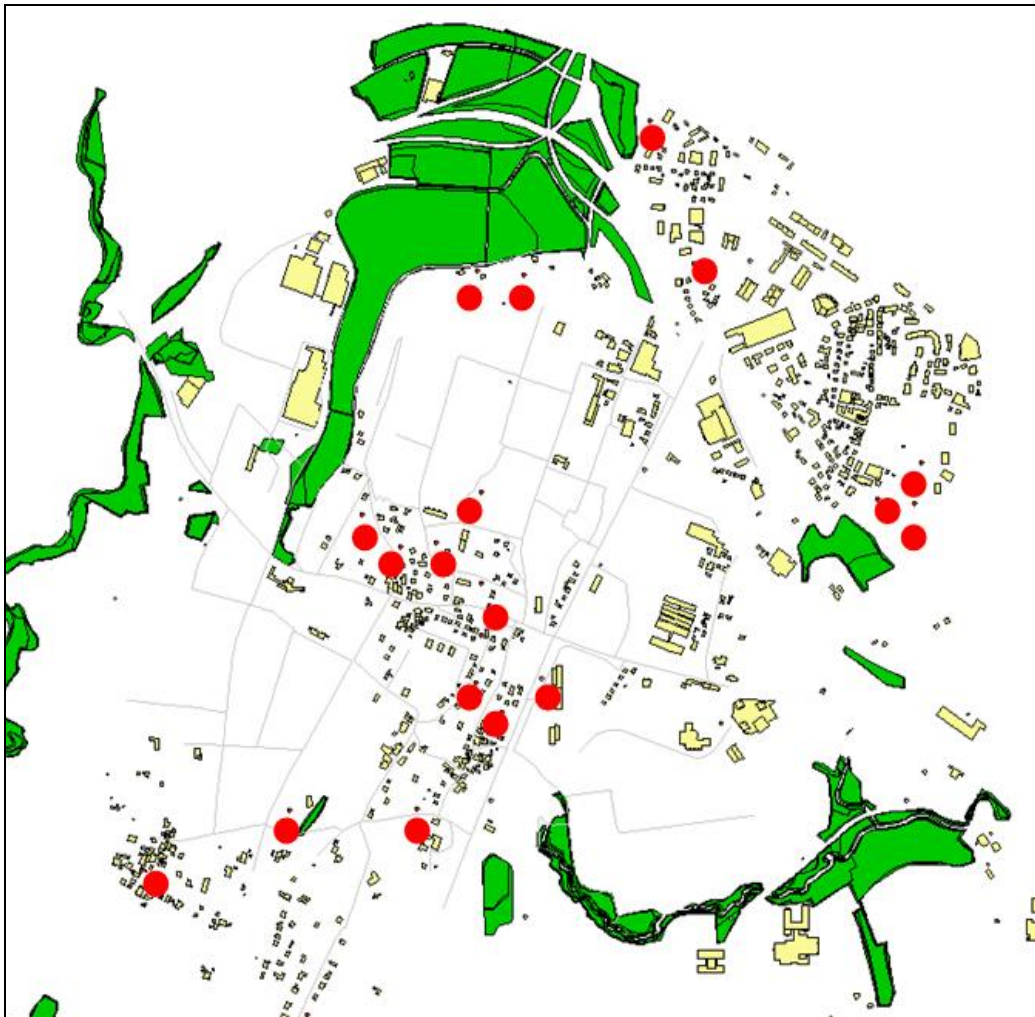


Figure 59: Groupes de bâtiments de type logement à créer dans les années 70 dans la zone de Chavannes-Près-Renens

Une école secondaire (collège) dessert en moyenne 2500 habitants. Sur ces 2500 habitants on trouve environ 425 élèves potentiels (en calculant avec une moyenne de 0.17 collégiens par logement). Lors de la demande par la Commune l'école devra calculer le nombre d'habitants qu'elle dessert à ce moment-là (ce calcul est effectué simplement en créant un buffer de 2000 mètres autour de l'école correspondant à sa capacité de perception et en calculant les habitants pour chaque bâtiment de type logement qui se trouve dans le buffer) et dire à la Commune si elle dispose encore de la place pour accueillir de nouveaux élèves.

#### 6. Modélisation de l'interaction :

Du point de vue de la communication entre les agents et de l'échange de messages, l'interaction se déroule selon les étapes suivantes :

- Envoi d'un **Message Action** du Groupe à la Commune : le nouveau Groupe a besoin d'une école et fait une demande à la Commune.



## CHAPITRE 6 : SIMULATIONS ET VALIDATION

### *Validation des résultats de simulation à l'échelle micro*

- Lecture du **Message Action** par la Commune et envoi d'un **Message Action** au Groupe : la Commune prend connaissance de la demande du Groupe et demande à ce dernier s'il dispose d'une école à proximité (dans son rayon d'action, i.e. à moins de 2000 mètres) et si oui quelle est la plus proche.
- Lecture du **Message Action** par le Groupe et envoi d'un **Message Valeur** par le Groupe à la Commune : le Groupe donne à la Commune le nom de l'école à proximité (l'identifiant de l'école dans la base de données).
- Lecture du **Message Valeur** par la Commune et envoi d'un **Message Valeur** à l'école : la Commune demande à l'Ecole de vérifier s'il lui reste de la place pour accueillir de nouveaux élèves.
- Lecture du **Message Valeur** par l'Ecole et envoi d'un **Message Valeur** : l'Ecole calcule le nombre d'habitants dans un rayon de 2000 mètres ainsi que le nombre d'Ecoles. De cette façon elle peut avoir une idée du nombre moyen d'habitants desservis par chaque Ecole dans ce buffer. Si le nombre d'habitants desservis par l'Ecole est supérieur à 2200 (= 2500 habitants desservis en moyenne par une Ecole – 300 habitants du groupe) alors la Commune devra créer une nouvelle Ecole pour les nouveaux collégiens. L'Ecole informe la Commune de l'acceptation ou du refus.
- Lecture du **Message Valeur** par la Commune : la Commune prend connaissance de la décision de l'Ecole. Suivant la réponse de l'Ecole on a les deux cas suivants :
  1. Si l'Ecole refuse d'accueillir de nouveaux élèves (cas considéré ici):
  2.
    - La Commune demande à l'Ecole de s'agrandir et cette dernière accepte.
    - Si l'Ecole refuse de s'agrandir : création d'une nouvelle Ecole à proximité du Groupe (cas considéré ici).
  3. Sinon en cas d'acceptation, l'Ecole peut accueillir les nouveaux élèves.

La fig. 60 montre la création de la nouvelle Ecole. Cette dernière ne s'est pas créée sur l'emplacement réel mais à proximité. Ce résultat est plus proche de la réalité suivant l'emplacement que celui de la simulation considérant le DS. La simulation par agents vecteurs semble donner des résultats plus proches de la réalité mais pour l'instant il est difficile d'aboutir à des conclusions tranchées. Il faudrait exécuter la simulation sur un autre jeu de données et dans un autre contexte pour valider ce résultat. En outre on a considéré plusieurs groupes de logements pour aboutir à un emplacement moyen et ce résultat est discutable étant donné la complexité des interactions dans le milieu urbain. Ce résultat diffère probablement du résultat obtenu si on n'avait considéré qu'un seul groupe de logements. Ce scénario n'est donc pas suffisant pour montrer la pertinence d'utiliser des agents multi-échelles. En outre le résultat aurait été probablement différent si l'on avait pris en considération les parcelles et le marché foncier.

## CHAPITRE 6 : SIMULATIONS ET VALIDATION

### Validation des résultats de simulation à l'échelle micro

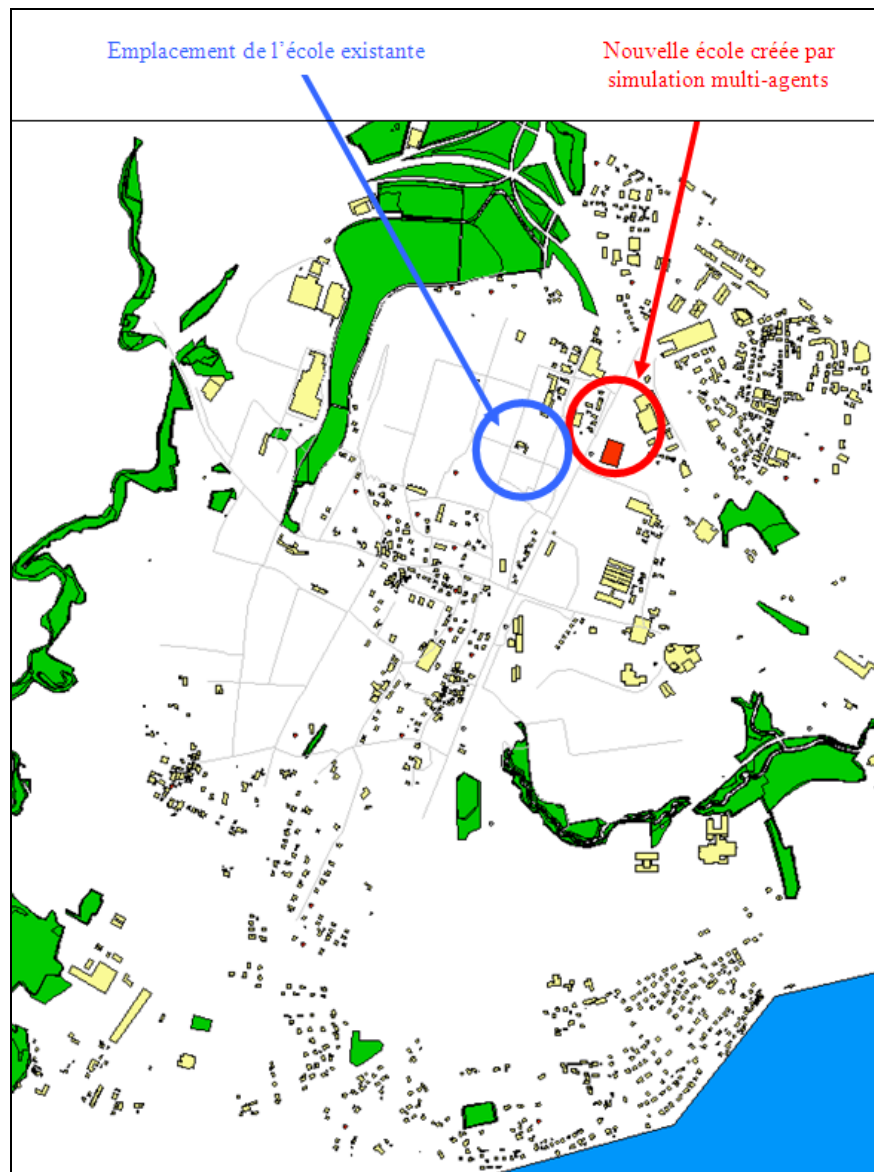


Figure 60: Nouvelle école créée par simulation multi-agents

De plus le résultat observé peut en fait être difficilement comparable à la réalité, car même s'il en diffère cela ne veut pas dire que les règles d'organisation que l'on a modélisées pour le milieu urbain ne sont pas pertinentes. Cela soulève un certains nombre d'interrogations concernant la démarche de validation du prototype. Par conséquent nous avons estimé, dans le cadre de cette thèse, que cette approche de validation au niveau micro était relativement difficile à mettre en place et avons donc opté pour une validation à l'échelle méso.

#### **b) Scénario 2: Création d'un groupe de logements pour étudiants suite à une augmentation du flux entrant d'étudiants dans la commune**

## CHAPITRE 6 : SIMULATIONS ET VALIDATION

### Validation des résultats de simulation à l'échelle micro

Ce scénario a également pour but de montrer l'importance des processus multi-échelles. Les résultats sont évalués à une échelle micro.

#### 1. Description conceptuelle du scénario :

L'accroissement du flux d'étudiants dans le système (la commune) va engendrer une réaction de la part de la Haute Ecole. La Haute Ecole est considérée comme un agent de type Bâtiment. Elle possède donc un comportement défini par des règles et s'adapte à son environnement (objets présents dans la commune). Elle va notamment déclencher une méthode pour gérer son nouveau flux d'entrée qui est le même que le flux d'entrée dans la commune. La Haute Ecole peut maintenant être vue comme un agent possédant un flux d'entrée et de sortie (qui correspond respectivement au nombre d'étudiants entrant dans le système et sortant du système) et suivant les postulats présentés au chapitre 2 comme un organisme vivant en interaction avec son environnement. En principe un organisme vivant doit maintenir l'homéostasie avec son milieu et gérer les flux (sa nourriture, etc.) variables de l'environnement et par analogie la Haute Ecole est supposée se comporter de la même façon : elle va devoir trouver des logements pour ses étudiants.

La situation considérée ici est représentée à la fig. 61. On considère que l'on a deux Hautes Ecoles (1 et 2) dans le système, ce qui correspond à la situation de la commune d'Ecublens.

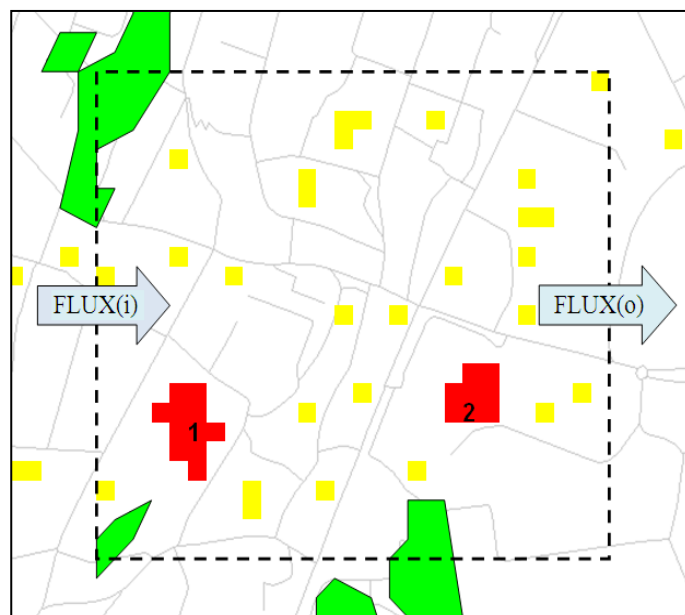


Figure 61: Flux d'étudiants (flèche bleue) entrant et sortant du système (trait-tillé) qui contient les Hautes Ecoles (HE(1) et HE (2), en rouge).

On considère pour la démonstration que le flux d'entrée dans le système est supérieur au flux de sortie :  $FLUX(i) > FLUX(o)$  dans la commune. L'agent Haute Ecole possède une perception de l'environnement et notamment des flux présents dans cet environnement. Les méthodes de l'agent lui permettent de percevoir son environnement et de gérer la variation des flux.

## CHAPITRE 6 : SIMULATIONS ET VALIDATION

### Validation des résultats de simulation à l'échelle micro

On analyse la situation du point de vue de la Haute Ecole no 1 (se référer à la fig.63 pour les séquences d'interaction). L'HE(1) met à jour la perception de son flux d'étudiants. Elle demande ensuite à l'HE(2) la valeur de son flux d'étudiants. L'HE(1) calcule le flux d'entrée (FLUX(i)) et vérifie s'il y a un dépassement du seuil défini dans ses règles comportementales. Si le seuil est dépassé, alors une méthode de création de logements pour étudiants est lancée. L'HE(1) demande à la Commune la création de logements pour étudiants. Si cette dernière accepte, des logements pour étudiants sont créés dans un rayon de 800m (rayon de perception) centré sur l'école en fonction du *Degré de Satisfaction* (fig. 62).

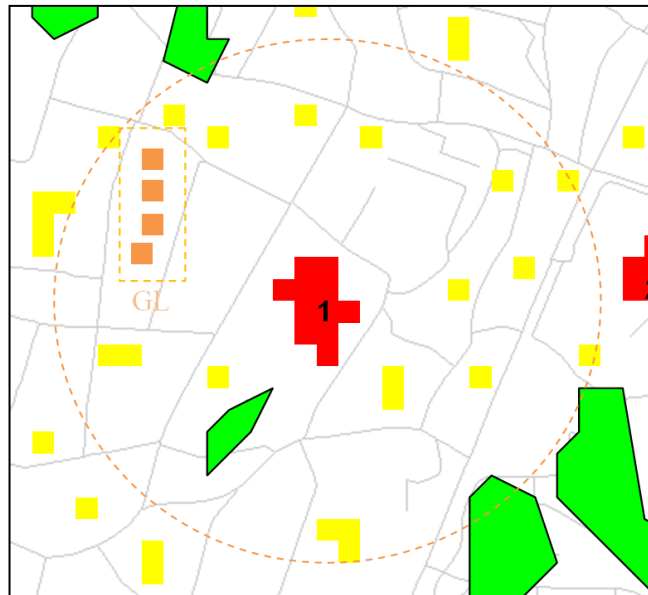


Figure 62: Création d'un groupe de logements

## CHAPITRE 6 : SIMULATIONS ET VALIDATION

### Validation des résultats de simulation à l'échelle micro

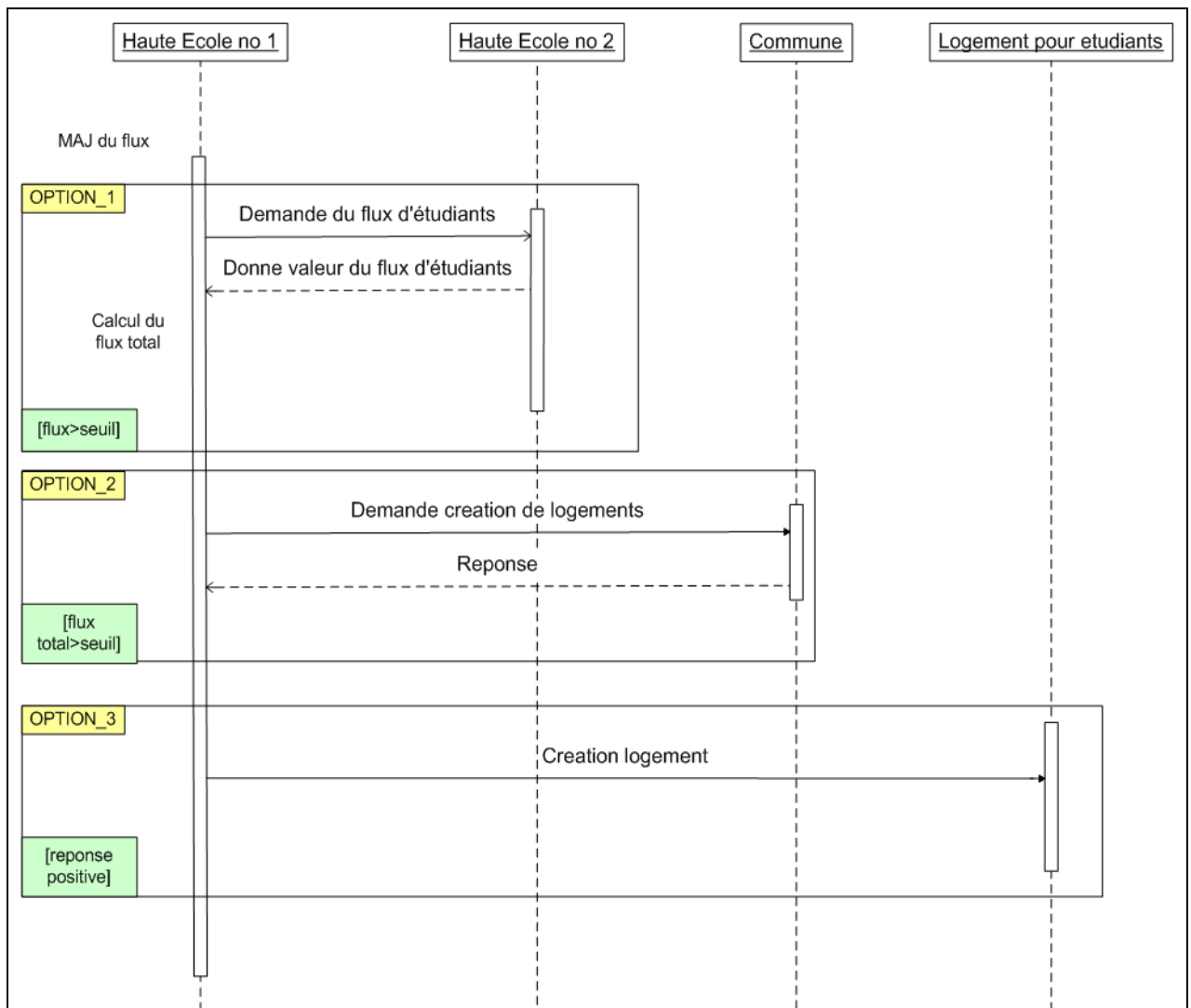


Figure 63: Diagramme UML des séquences

#### 2. Résultats de la simulation et validation du scénario :

Le contexte de la simulation est la commune de Chavannes. On y trouve deux hautes écoles : l'EPFL et l'Université de Lausanne. Ces deux écoles gèrent en commun leurs logements d'étudiants. Parmi tous les logements pour étudiants on peut citer en particulier les maisons pour étudiants FMEL (Fondation Maisons pour Etudiants de Lausanne : <http://fmel.ch/fr/>). Ces maisons regroupent à elles seules plus de 1100 étudiants à l'heure actuelle. On s'intéresse plus particulièrement ici à la Maison des Triaudes qui a été construite en 1995. Pour faire face au flux croissant d'étudiants l'EPFL et l'Université de Lausanne ont demandé la création de logements supplémentaires dont la Maison des Triaudes. Pour comparer notre simulation à la situation existante on est parti de la situation de la commune en 1994 du point de vue de l'urbanisation (fig. 64).

## CHAPITRE 6 : SIMULATIONS ET VALIDATION

### Validation des résultats de simulation à l'échelle micro

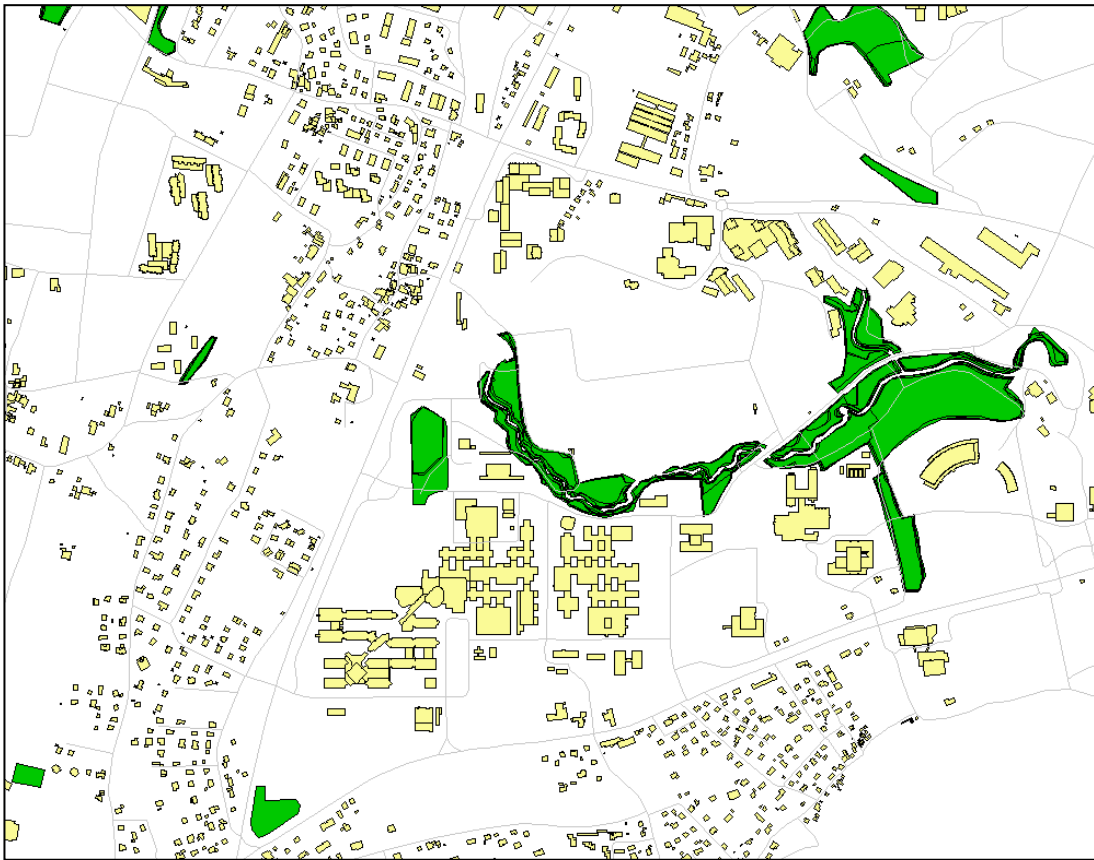


Figure 64: Commune de Chavannes et d'Ecublens en 1994

Après avoir lancé la simulation on obtient le résultat présenté à la fig. 65. On a également réalisé une simulation en se basant uniquement sur le DS, donc sans communication entre les agents et sans interaction multi-échelles (le résultat n'est pas montré). Le nouveau bâtiment créé se place à peu près au même endroit que le bâtiment créé par simulation multi-agents, il n'y a donc pas de différence significative entre les deux simulations. En suivant cette approche de validation qui est une approche à l'échelle micro et pour les raisons déjà évoquées pour le premier scénario, il est difficile d'aboutir à des conclusions sur la capacité du simulateur à reproduire des phénomènes dynamiques urbains existants. Dans le paragraphe suivant on va introduire la représentation et la détection de groupes urbains, ce qui nous permettra ensuite d'élaborer une approche de validation à l'échelle méso du simulateur multi-agents.

## CHAPITRE 6 : SIMULATIONS ET VALIDATION

Vérification de l'extensibilité du prototype : étude de cas pour le paramètre visibilité

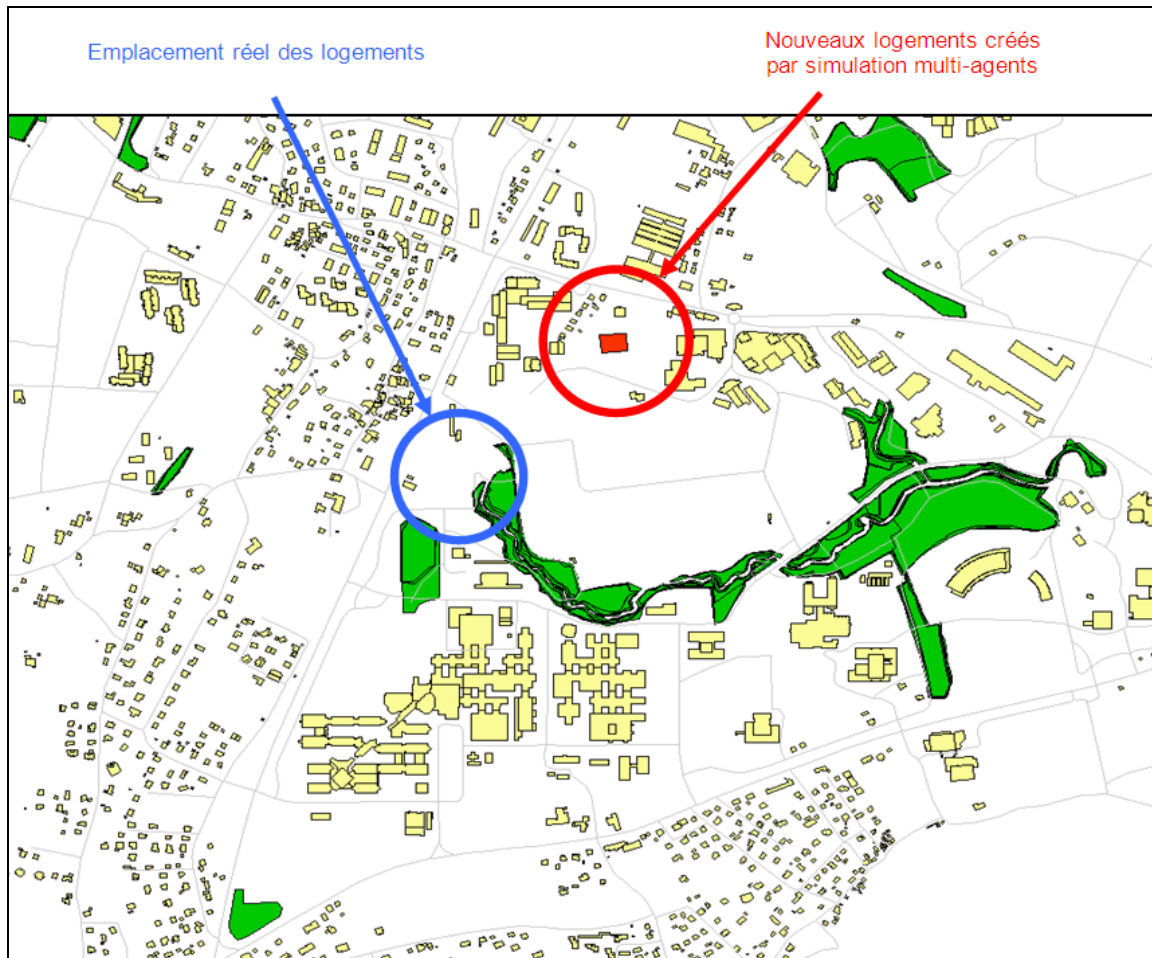


Figure 65: Création de logements pour étudiants

### 6.3 Validation des résultats à l'échelle méso

Nous nous proposons dans ce paragraphe de montrer la validation de notre prototype à l'échelle méso. Les scénarios qui seront proposés seront suffisants pour montrer la pertinence du prototype, en ce qui concerne sa capacité à simuler et représenter les processus d'organisation urbaine et à valider leurs règles d'organisation.

On a opté pour cette échelle de validation pour les raisons suivantes :

- Les simulations présentées montrant la création d'un bâtiment à un emplacement donné ne nous ont pas permis de valider le simulateur et montrent clairement les limites d'une approche de validation limitée au niveau micro. Etant donné la nature multi-échelle des processus intervenant dans le milieu urbain, il est souhaitable de pouvoir valider le simulateur à différentes échelles, notamment à l'échelle méso qui incorpore l'échelle micro. En effet une simulation donnée pourra être loin de la réalité à une certaine échelle de simulation et plutôt réaliste à une autre.

## CHAPITRE 6 : SIMULATIONS ET VALIDATION

### *Vérification de l'extensibilité du prototype : étude de cas pour le paramètre visibilité*

- Les tentatives pour quantifier de manière absolue certains phénomènes naturels (notamment si l'on se place à l'échelle micro) peuvent conduire à des modèles erronés et l'identification *soit-disant* exhaustive de tous les paramètres influant le phénomène que l'on cherche à simuler produit en elle-même des incertitudes. En effet dans le contexte de simulation que l'on étudie ici, de nombreux paramètres interviennent et leur stabilité peut varier et présentent des propriétés non-linéaires. En outre comme on l'a vu précédemment il est relativement difficile de décrire les processus à l'œuvre dans le milieu urbain par des formules mathématiques quantitatives ne tenant pas compte de la notion d'échelle.
- En outre Couclelis [Couclelis, 2003] note que l'erreur dans les modèles SIG ne peut pas être évitée. Il y a ainsi un certain nombre de choses qui ne peuvent pas être connues (questions sans réponse) mais qui ne sont pas le résultat d'une imperfection de l'information. L'auteur admet en outre qu'il faut voire l'incertitude comme une propriété intrinsèque des systèmes complexes. Nous nous rangeons donc à ce point de vue étant donné que nous considérons la ville comme un système complexe.

### **6.3.1 Représentation et détection de groupes urbains**

Avant de pouvoir valider nos résultats à l'échelle méso nous devons tester notre méthodologie d'extraction de groupes urbains présentée au chap. 5. Afin de tester cette méthodologie nous avons conduit plusieurs études présentées ci-dessous.

#### **a) Etude de cas 1**

Cette étude présente l'extraction d'indicateurs morphologiques dans le contexte de l'analyse des Groupes d'Habitats. Elle a notamment donné lieu à une publication [Carneiro et al, 2008]. Plusieurs recherches ont été conduites afin d'appliquer des données SIG et des données LIDAR afin d'extraire des indicateurs morphologiques 3D (propriétés) des bâtiments, tels que la complexité 3D, le volume 3D total et le type de toit. Ces indicateurs sont utilisés comme input dans l'analyse des groupes urbains présentés ici.

La zone d'étude est la région de Chavannes-Près-Renens (fig. 66).



## CHAPITRE 6 : SIMULATIONS ET VALIDATION

Vérification de l'extensibilité du prototype : étude de cas pour le paramètre visibilité

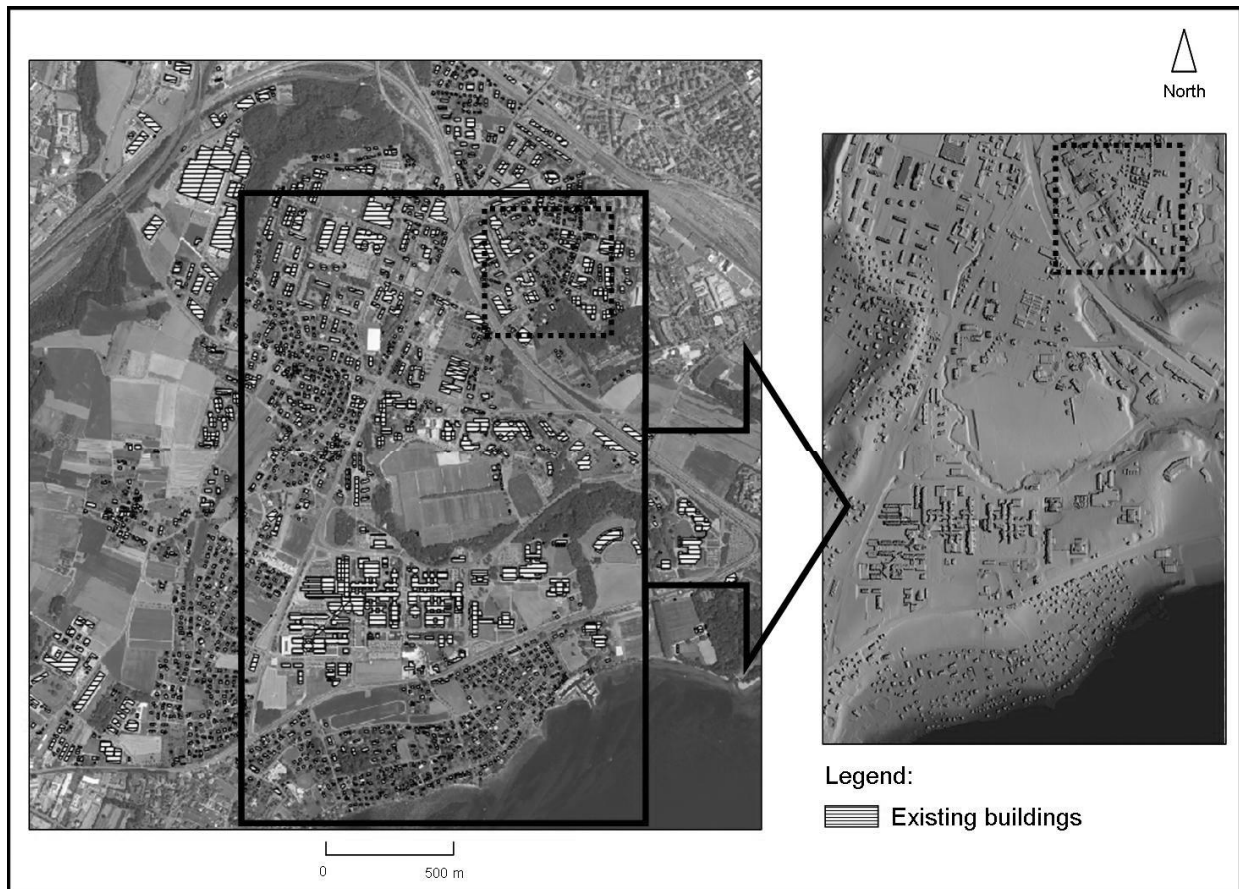


Figure 66: Figure de gauche: empreinte cadastrale des bâtiments et vue aérienne du district de Chavannes près de la ville de Lausanne; figure de droite: modèle de surface urbain 2.5D de Chavannes. Le rectangle noir représente notre zone d'étude, de dimensions 500x500 m [Carneiro et al, 2008]

### 1. Calcul des indicateurs morphologiques en utilisant des données cadastrales et des données LIDAR :

Un travail de recherche a été entrepris dans le but d'appliquer les données cadastrales et les données LIDAR afin de calculer des indicateurs morphologiques 3D, tels que le volume, la complexité 3D, le type de toit et la pente moyenne du toit. En fait notre prototype implémente une méthodologie de modélisation 3D dans laquelle le volume est calculé en multipliant la surface de chaque bâtiment (dérivée des résultats de la simulation) par sa hauteur (dérivée du nombre d'étages de chaque bâtiment multiplié par 3, valeur considéré comme étant la hauteur moyenne, en mètres, de chaque étage de bâtiment). Ainsi en utilisant différentes techniques dérivées de données cadastrales et du LIDAR, cela nous permet d'interpoler la forme 3D (d'évaluer sa complexité), de calculer le volume, de définir le type de toit ou de déterminer la pente moyenne du toit de chaque bâtiment plus précisément [Zwolack, 2008]. Dans ce cas, les bâtiments sont modélisés de trois manières différentes :

- **Calcul de volume:** en utilisant un modèle urbain 3D construit au moyen d'une approche hybride utilisant des données cadastrales et LIDAR.

## CHAPITRE 6 : SIMULATIONS ET VALIDATION

### *Vérification de l'extensibilité du prototype : étude de cas pour le paramètre visibilité*

- **Complexité 3D** : les points LIDAR extraits sont classifiés selon des parties différentes (avec différentes géométries) de chaque enveloppe de bâtiment, ce qui nous permet d'analyser et de classifier sa complexité [Lohani and Singh, 2007].
- **Type de toit et pente moyenne du toit** : en appliquant la même méthodologie que pour la complexité 3D, on obtient une classification du type de toit ainsi que la valeur de sa pente [Lohani and Singh, 2007].

#### 2. Sources de données utilisées :

La base de données SIG 2D du canton de Vaud a été utilisée pour extraire des informations de type vectoriel concernant les bâtiments de la manière suivante :

- Pour chaque bâtiment à analyser, on peut extraire, à partir de sa géométrie, quelques propriétés morphologiques.
- En utilisant une approche hybride intégrant les empreintes cadastrales des bâtiments et les données LIDAR en brut, on a construit un n2.5-DUSM plus précis [Carneiro et al, 2008].

#### 3. Analyse des groupes urbains :

On a testé la méthode de détection des groupes (sans application de données cadastrales ou LIDAR) dans notre zone d'étude. La fig. 67 montre l'emplacement de quatre zones d'étude dans la commune de Chavannes (ville de Lausanne).

La fig. 68 montre la nouvelle représentation de la ville à une échelle méso, basée sur les Groupes d'Habitats de la zone d'étude.

La fig. 69 montre les groupes de logement détectés dans notre zone d'étude. On peut conclure de cela, bien que des résultats significatifs puissent être obtenus utilisant cette méthode, qu'il y a des améliorations à apporter pour les raisons suivantes :

## CHAPITRE 6 : SIMULATIONS ET VALIDATION

Vérification de l'extensibilité du prototype : étude de cas pour le paramètre visibilité

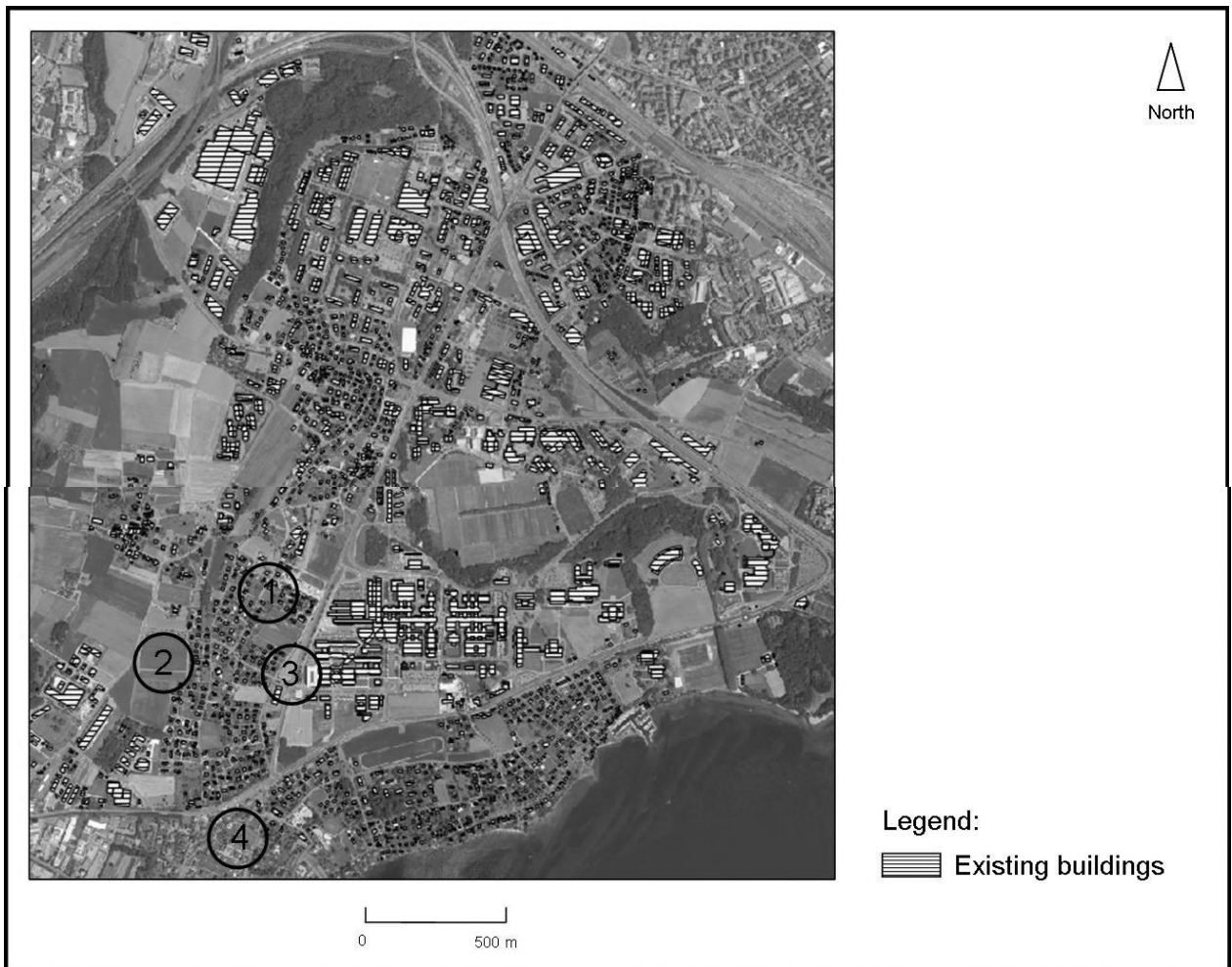


Figure 67: Quatre zones d'étude dans le district de Chavannes, avec la position approchée des groupes extraits.

- Dans l'exemple 1 (Extract\_1) on peut voir 5 bâtiments correctement détectés. Bien que les liens soient créés en fonction de leur similarité de forme, le résultat présente un groupe inhomogène par rapport à la complexité 2D. En effet, le bâtiment au sommet de la figure possède une complexité de 10 points en dépit du fait que les autres bâtiments ont une complexité de 4 ou 6 points.

## CHAPITRE 6 : SIMULATIONS ET VALIDATION

*Vérification de l'extensibilité du prototype : étude de cas pour le paramètre visibilité*

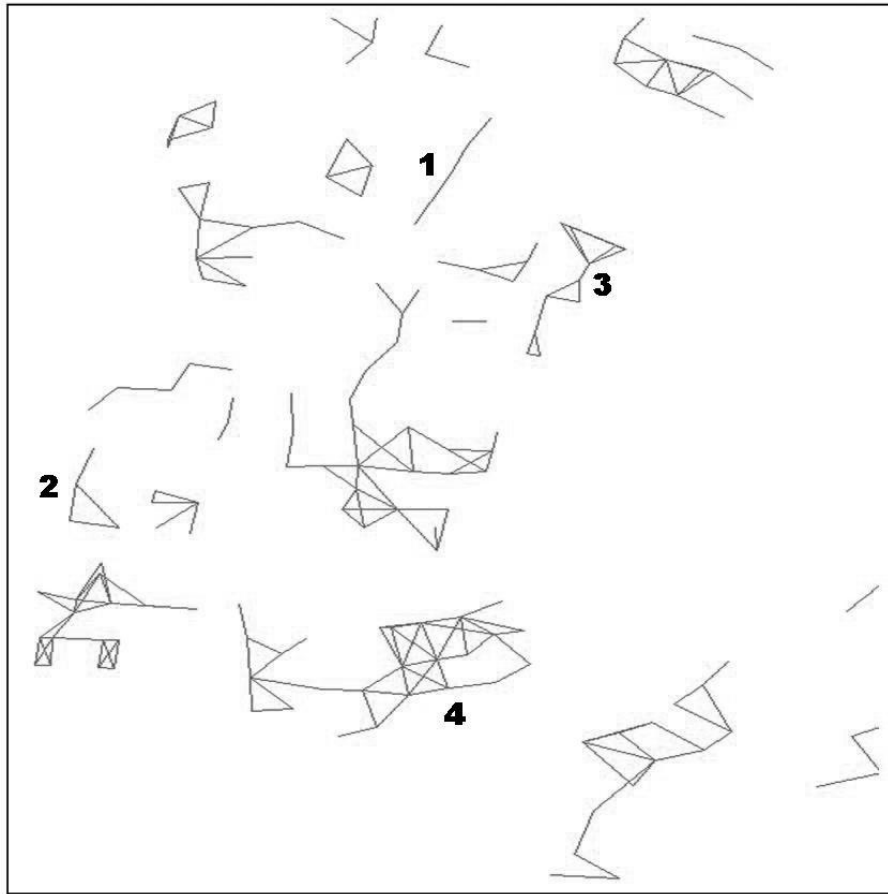


Figure 68: Groupes détectés

- L'exemple 2 (Extract\_2) montre un groupe de bâtiments de complexité homogène. Toutefois, il est difficile de déterminer si sa forme est un triangle ou une ligne.
- L'exemple 3 (Extract\_3) montre des doubles liens dus à l'existence de bâtiments contigus. Ainsi en considérant des développements ultérieurs, nous devrions ajouter ce type de bâtiment à la détection des liens ou le considérer comme un type de bâtiment possédant une forme particulière.
- Dans l'exemple 4 (Extract\_4) on peut identifier un groupement sous forme carrée. Toutefois, on remarque que quelques liens ne sont pas pertinents. De ce fait ils perturbent la représentation de la ville au niveau méso.

## CHAPITRE 6 : SIMULATIONS ET VALIDATION

Vérification de l'extensibilité du prototype : étude de cas pour le paramètre visibilité

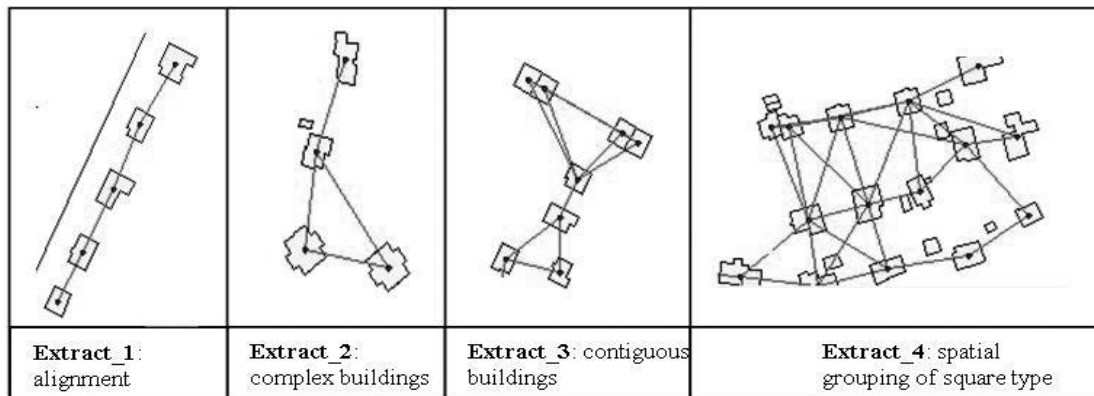


Figure 69: Zoom sur le résultat de différents groupes détectés

D'après les résultats montrés ci-dessus, quelques imprécisions sont générées par la méthode de détection présentée. Il est dès lors nécessaire d'améliorer la méthode de détection en améliorant d'une part les algorithmes de détection et d'autre part l'inexactitude inhérente aux données d'entrée utilisées.

Ce dernier point peut notamment être amélioré en utilisant des données LIDAR disponibles, qui nous permettent d'extraire des indicateurs pertinents, tels que le volume et le type de toit de chaque bâtiment, afin de détecter les groupes de logements.

Une approche hybride dérivée de données cadastrales et de données LIDAR permet une analyse rapide et précise de propriétés morphologiques des bâtiments, telles que la complexité 3D, le volume 3D et le type de toit et peuvent être utilisées pour diverses applications. L'utilisation de ce type de données en simulation urbaine peut être un outil très utile qui permet une simulation et une analyse rapide de l'évolution de la forme de la ville dans des domaines se trouvant au-delà du champ de la géomatique.

L'accès facilité à des données utiles pour la simulation est un facteur déterminant pour un développement futur de notre prototype, car comme tout simulateur informatique, il requiert des données d'entrée. La capacité à utiliser différentes sources de données rend aussi notre prototype adaptable et pertinent pour la simulation d'un système complexe tel que le milieu urbain, pour lequel un grand nombre de données hétérogènes existent.

### b) Etude de cas 2

Comme déjà mentionné auparavant les données SIG et des données dérivées du système LIDAR peuvent être utilisées dans l'extraction de propriétés morphologiques de bâtiments qui sont regroupées dans des descripteurs. Les descripteurs morphologiques que l'on a étudié dans cette étude de cas sont la hauteur moyenne, le volume total, le nombre de faces, la surface au sol, la surface des façades, l'aire du toit, la surface de l'enveloppe, le type de toit, la complexité calculée en faisant le rapport entre la surface de l'enveloppe et la surface au sol, la complexité calculée en faisant le rapport entre la surface de l'enveloppe et le volume total et enfin la complexité calculée en faisant le rapport entre le volume total et le nombre de faces. Les données morphologiques des bâtiments étudiés sont dérivées, d'une part, de

## CHAPITRE 6 : SIMULATIONS ET VALIDATION

### *Vérification de l'extensibilité du prototype : étude de cas pour le paramètre visibilité*

la base de données cadastrale 2D et du modèle urbain de surface 2.5 D normalisé d'une résolution 1x1m construit à partir d'une approche hybride utilisant des données SIG et des données LIDAR [Carneiro et al, 2009], et d'autre part d'une procédure de segmentation de données LIDAR en brut.

Comme précédemment notre zone d'étude se trouve dans la commune de Chavannes, comme montré sur la partie gauche de la fig. 66.

#### 1. Extraction des descripteurs morphologiques des bâtiments :

Cette étude de cas utilise des données géo-référencées de dimension 2 ou 3 pour l'extraction automatique de descripteurs urbains. Ces descripteurs peuvent être associés à chaque bâtiment individuellement. Ces descripteurs nous fournissent un large éventail de possibilités en analyse spatiale, permettent une meilleure représentation des objets urbains et pourraient devenir des outils intéressants en planification urbaine [Carneiro et al, 2009].

Pour chaque bâtiment à analyser on calcule les descripteurs morphologiques suivants :

1. Hauteur moyenne
2. Volume total
3. Nombre de faces
4. Surface au sol
5. Surface des façades
6. Surface du toit
7. Surface de l'enveloppe
8. Type de toit
9. Complexité\_1
10. Complexité\_2
11. Complexité\_3

#### 2. Méthodologie implémentée pour le calcul des descripteurs des bâtiments :

En regroupant les points LIDAR appartenant à l'empreinte cadastrale d'un bâtiment, il est possible de calculer la hauteur moyenne des bâtiments (descripteur 1). Pour le calcul du volume (descripteur 2) on utilise le n2.5-DUSM. Le nombre de faces d'un bâtiment (descripteur 3) est calculé en additionnant le nombre de façades (murs extérieurs des bâtiments) et le nombre de façades appartenant aux toits. Le nombre de façades est calculé à partir de la géométrie (de type ligne) stockée dans la base de données 2D. Ainsi une ligne appartenant au même bâtiment correspond à une façade. En les additionnant on obtient le nombre total de façades [Carneiro et al, 2009] (fig. 70).

## CHAPITRE 6 : SIMULATIONS ET VALIDATION

Vérification de l'extensibilité du prototype : étude de cas pour le paramètre visibilité



Figure 70: Exemple de géométrie (points et lignes) appartenant à notre zone d'étude, stockée dans la base de données cadastrale 2D

La surface au sol de chaque bâtiment (descripteur 4) est directement calculée à partir de la géométrie de la surface stockée dans la base de données cadastrale 2D (fig. 71).

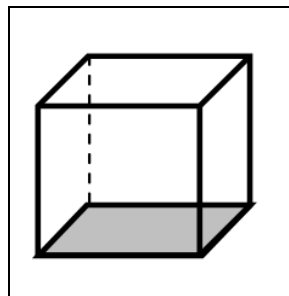


Figure 71: Surface au sol (gris)

L'aire des surfaces des façades (descripteur 5) est calculée selon des techniques de traitement d'images. La procédure de segmentation utilisée pour les données LIDAR permet la création de toits plats en termes d'orientation et de pente. Ainsi il est possible de calculer la surface réelle (descripteur 6) de chaque partie du toit en utilisant l'angle de la pente. La surface de l'enveloppe (descripteur 7) est calculée en additionnant la surface au sol, la surface des façades et la surface du toit. La classification selon le type de toit (descripteur 8) a été réalisée en classifiant les bâtiments selon le nombre de faces et la pente du toit. Les composantes des bâtiments consistent en des éléments cuboïdes avec différents types de toits : toit plat, toit classique et toit complexe [Carneiro et al, 2009] (fig. 72).

## CHAPITRE 6 : SIMULATIONS ET VALIDATION

Vérification de l'extensibilité du prototype : étude de cas pour le paramètre visibilité

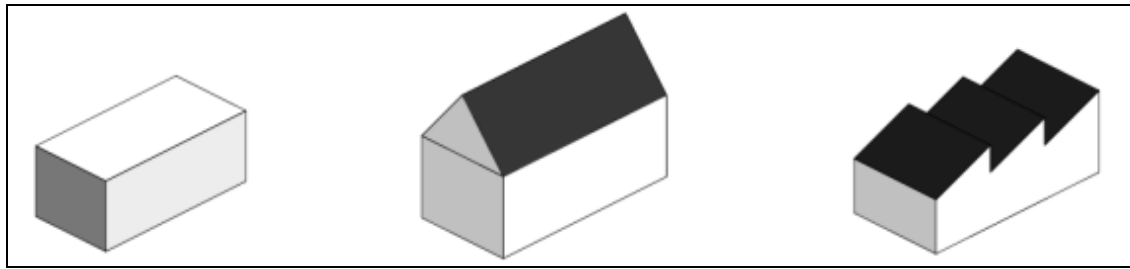


Figure 72: Différents types de toits, de gauche à droite: toit plat, toit classique et toit complexe

La complexité d'un bâtiment se réfère à sa forme physique et à la distribution de son volume dans l'espace (fig. 73).

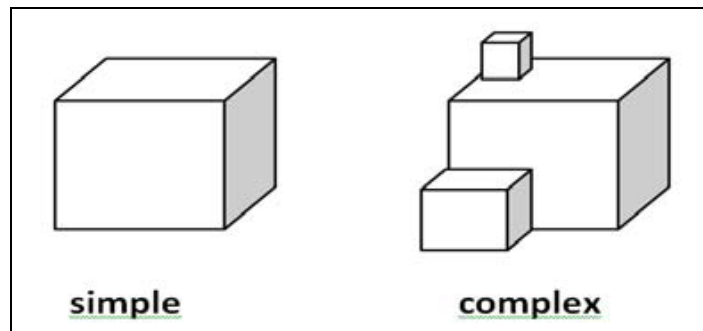


Figure 73: Bâtiment de faible complexité (à gauche) et bâtiment de grande complexité (à droite)

La complexité des bâtiments est déterminée suivant trois approches différentes qui sont calculées indépendamment et reportées dans l'analyse des résultats :

- **complexité\_1** (descripteur 9) = rapport entre la surface totale (surface au sol + surface des façades + surface du toit) et la surface du sol ;
- **complexité\_2** (descripteur 10) = rapport entre la surface de l'enveloppe (surface au sol + surface des façades + surface du toit) et le volume total du bâtiment;
- **complexité\_3** (descripteur 11) = rapport entre le volume total du bâtiment et le nombre de faces composant la surface du bâtiment.

### 3. Groupes urbains :

Comme déjà dit auparavant, on peut détecter la présence de structures organisées dans les groupes d'habitat urbains. Elles représentent des figures géométriques régulières appelées groupes parce qu'ils reflètent le regroupement des bâtiments selon certains critères (même figure géométrique, complexité, etc.). Ces groupements peuvent être trouvés à plusieurs échelles. On voit ainsi la pertinence d'utiliser une approche multi-échelles pour la compréhension des processus urbains.

Premièrement une sélection des bâtiments de même fonction est effectuée :

- 113 : logement de moyenne densité



## CHAPITRE 6 : SIMULATIONS ET VALIDATION

### Vérification de l'extensibilité du prototype : étude de cas pour le paramètre visibilité

- 191 : logement + garage

#### 4. Analyse des résultats :

Les groupes dans la zone de Chavannes ont été détectés avec les descripteurs morphologiques. La fig. 74 montre les résultats de la détection avec trois types de descripteurs de complexité. Le processus de détection a été réalisé en tenant et en ne tenant pas compte du descripteur *type de toit*.

complexity descriptor	type of roof	function	nb of links	nb of groups
<b>complexity_1</b>	No	113	138	34
	Yes	113	129	31
	No	191	15	13
	Yes	191	12	11
<b>complexity_2</b>	No	113	138	34
	Yes	113	129	31
	No	191	15	13
	Yes	191	12	11
<b>complexity_3</b>	No	113	114	33
	Yes	113	109	30
	No	191	15	13
	Yes	191	12	11

Figure 74: Résultats de l'analyse des trois types de complexité

Un résultat visuel est montré à la fig. 75 avec le descripteur *complexité\_1* et aussi en considérant le descripteur *type de toit*. Elle montre un zoom dans une zone précise où quatre bâtiments forment un groupe composé de trois liens.

On peut faire les observations suivantes : il n'y a pas de différence significative dans la détection entre les paramètres *complexité\_1* et *complexité\_2*. On peut conclure également que ces paramètres décrivent le même type de complexité étant donné qu'ils permettent le même type de regroupement. Le paramètre *complexité\_3* représente une complexité différente par rapport à la fonction 113 mais pas par rapport à la fonction 191. Ainsi la fonction 191 semble montrer une grande régularité du point de vue des descripteurs de complexité. Il est intéressant de noter que l'influence de la définition de la complexité varie selon le type de bâtiment. En outre le descripteur *type de toit* a un impact sur toutes les approches de détection et sur tous les types de bâtiments, ce qui signifie qu'il est un indicateur important et discriminant. Les résultats de la détection nous amènent à conclure qu'il est important de bien choisir et définir les descripteurs pour la détection des groupes de bâtiments d'un type donné. En outre la précision des descripteurs est importante pour assurer la fiabilité de la détection.

## CHAPITRE 6 : SIMULATIONS ET VALIDATION

*Vérification de l'extensibilité du prototype : étude de cas pour le paramètre visibilité*

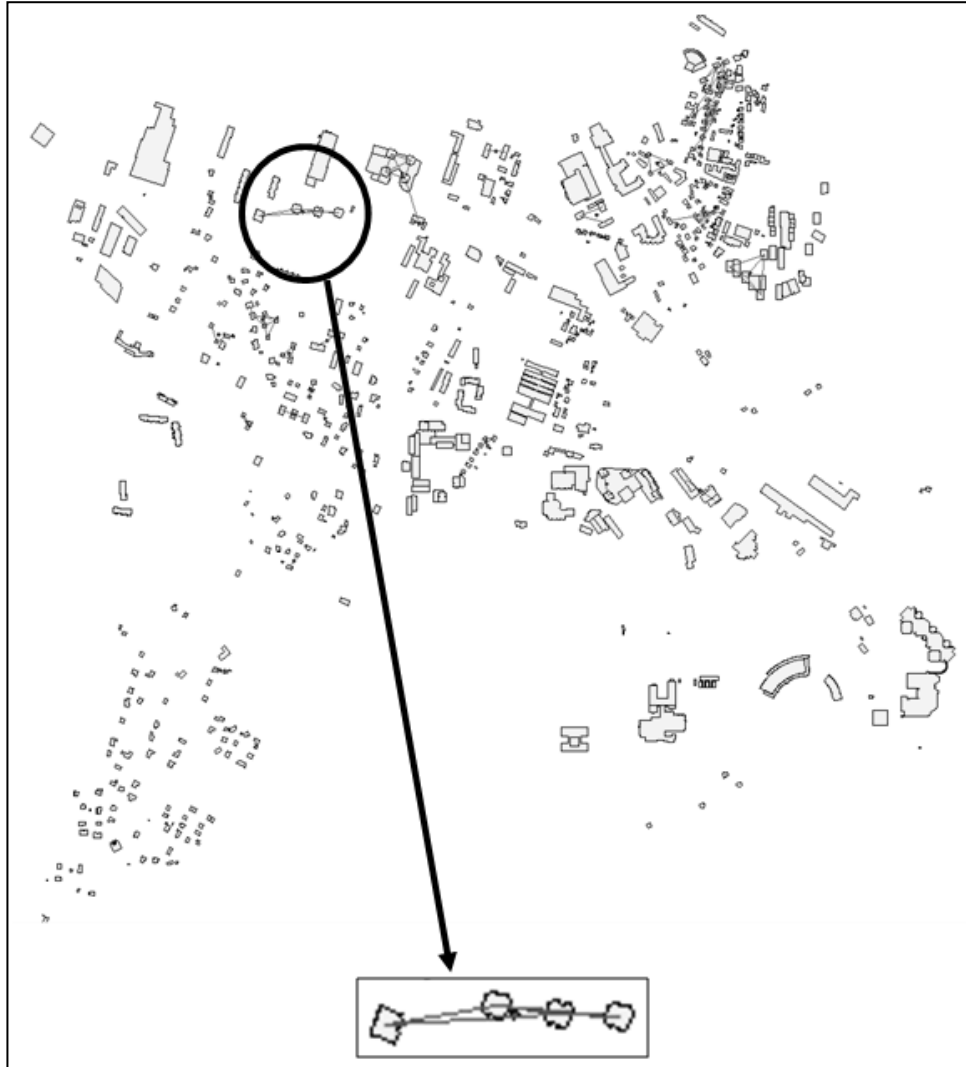


Figure 75: Résultats de la détection dans la zone de Chavannes avec zoom sur un groupe

Certains descripteurs ont plus d'influence que d'autres, mais cette qualité doit être corrélée avec les propriétés des descripteurs et non pas être due à une imprécision des données d'entrée. Les données d'entrée obtenues avec le LIDAR permettent d'assurer une bonne précision et d'obtenir des descripteurs très pertinents pour ce type d'analyse.

La méthodologie décrite ci-dessus montre la pertinence des indicateurs pour la détection des groupes. En fait avec des indicateurs pertinents des groupes urbains définis peuvent être correctement détectés. En ce qui concerne de potentiels travaux futurs la même méthodologie pourrait être utilisée afin de détecter des systèmes urbains, qui consistent en des groupements urbains plus étendus et montrant des propriétés d'organisation similaires. Ces structures spatiales abstraites sont complexes à détecter et les résultats présentés ici ouvrent des perspectives intéressantes pour l'usage de données LIDAR de haute résolution dans le cadre de ce type de détection [Carneiro et al, 2009].

## CHAPITRE 6 : SIMULATIONS ET VALIDATION

### *Vérification de l'extensibilité du prototype : étude de cas pour le paramètre visibilité*

Notre prototype permet, grâce à sa capacité à détecter les groupements urbains, de prendre en compte les processus multi-échelles se déroulant dans le milieu urbain. Le paragraphe suivant présente un exemple de ces processus multi-échelles et la détection de structures urbaines.

#### **6.3.2 Simulation de la croissance urbaine**

Pour notre approche de validation à l'échelle méso, nous avons défini le critère de validation suivant :  
*Les formes géographiques produites par la création simulée de bâtiments de type logement doivent être semblables à celles que l'on observe dans la réalité, en particulier les formes dans les Groupes d'Habitats.*

On se propose ici de montrer la croissance (augmentation du nombre de bâtiments) de la ville. Pour cela on part d'une «ville artificielle». C'est-à-dire que l'on considère une zone construite délimitée sur le territoire (espace géographique) avec un certain nombre de bâtiments (tels que des bâtiments de logements, des commerces, etc.). Ces bâtiments sont repris de la réalité (zone de Chavannes-Près-Renens), c'est-à-dire qu'ils existent sur le terrain. Afin de montrer la croissance, certains de ces bâtiments ont été volontairement supprimés de la base de données. On considère également seulement une certaine partie des réseaux de transport (les routes) existants. On a ainsi un ensemble de bâtiments et de réseaux qui sont les objets existants dans l'environnement multi-agents.

Le processus de simulation fait intervenir simplement la création d'un bâtiment à un emplacement du territoire déterminé par le *Degré de Satisfaction* du bâtiment. C'est une simulation par événements (5.3.4) : à chaque pas de temps on active l'ensemble des agents selon un ordre choisi aléatoirement et leurs actions si les seuils d'activation sont atteints.

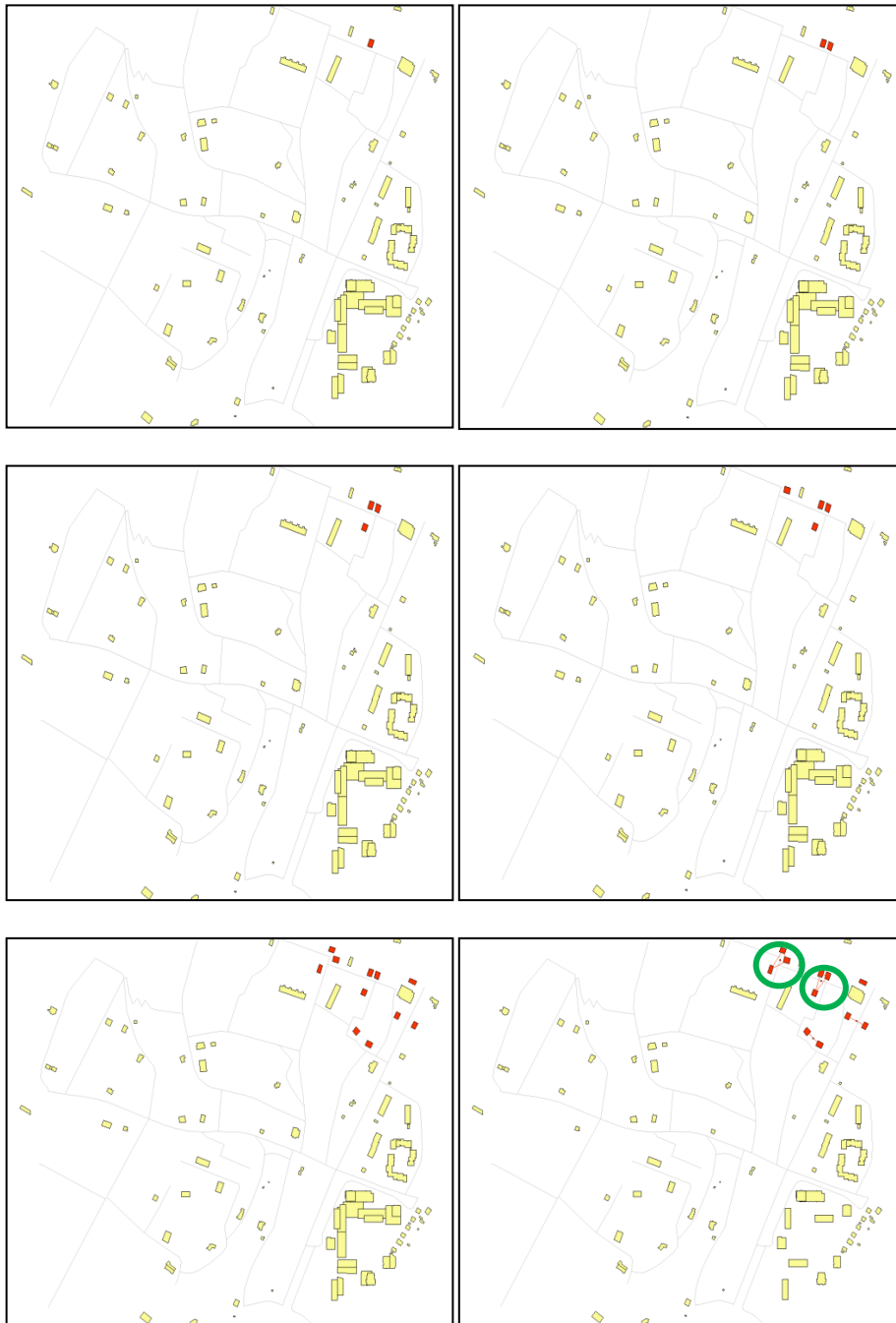
De manière « naturelle » et selon les lois de la morphogenèse admises comme hypothèse, les objets du territoire que sont les bâtiments vont entrer en interaction et vont produire des changements dans l'organisation du territoire urbain. Le résultat sera de nature morphogénétique (fig. 76), c'est-à-dire qu'il y aura apparition de formes. Ces formes présentent une régularité géométrique correspondant aux Groupes d'Habitats déjà définis.

Les étapes de la simulation sont les suivantes :

- 11 (valeur arbitraire) logements se créent dans l'espace urbain suivant leurs règles de décision et selon leur *Degré de Satisfaction*.
- On détecte les groupes d'habitat créés grâce aux algorithmes de détection.

## CHAPITRE 6 : SIMULATIONS ET VALIDATION

*Vérification de l'extensibilité du prototype : étude de cas pour le paramètre visibilité*

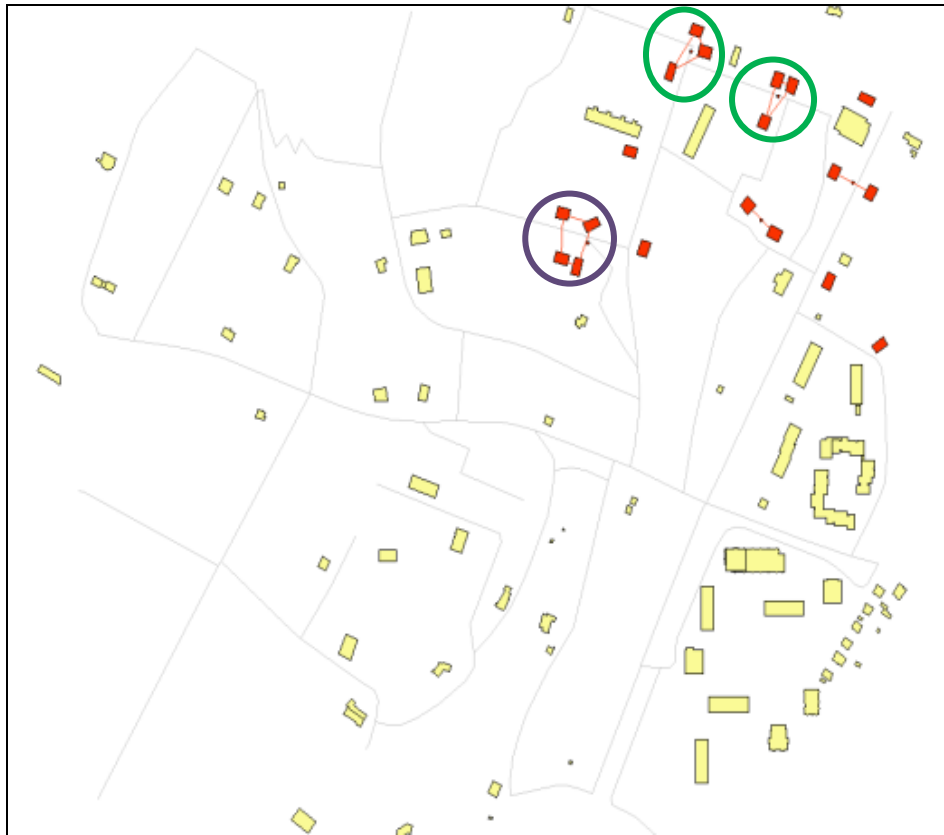


**Figure 76: Simulation de la croissance urbaine (la figure se lit de gauche à droite et de haut en bas)**

L'observation de la fig. 77 nous permet de noter la présence de formes représentatives de groupements de logements tels qu'on en trouve dans la réalité. La présence dans la ville de groupements de logements composés de 3 et 4 bâtiments a été en outre posée comme postulats dans cette recherche. Notamment on remarque (fig.74) la présence de groupes de 3 et 4 bâtiments, détectés selon les critères définis auparavant. Ce résultat de simulation nous permet de valider à l'échelle méso notre simulateur.

## CHAPITRE 6 : SIMULATIONS ET VALIDATION

*Vérification de l'extensibilité du prototype : étude de cas pour le paramètre visibilité*



**Figure 77: Résultat final de la simulation**

Par comparaison avec l'existant le résultat de la simulation nous permet de confirmer qu'au niveau des groupes la simulation est représentative de la réalité territoriale urbaine. En effet dans la zone d'étude (Chavannes, Lausanne) les formes des Groupes d'Habitats sont de cette nature, comme on peut le remarquer à la fig. 78 reprise de la fig. 67. On a mis en évidence les groupes de logements, en ne tenant pas compte des imperfections de la méthode de détection, notamment des liens superflus.

Après discussion avec les architectes (Jong-Jin Park) ce type notre simulateur s'avère utile étant donné qu'il permettrait de prévoir la création des Groupes d'Habitats dans le territoire. Il permet ainsi de comprendre le mécanisme de production de formes dans le territoire. En outre il offre une nouvelle représentation du territoire de nature vectorielle que l'on peut faire évoluer de façon dynamique. Ainsi notre simulateur peut être considéré comme valide pour cet usage en particulier.

Pour des raisons de temps nous n'avons pas pu élaborer plus des scénarios de simulation plus complexes, comme la création d'écoles et de logements dans une même simulation. Il aurait en effet été intéressant de voir l'organisation des groupes de logements autour de bâtiments influençant tels des services. Pour une validation pour étendue du prototype ces scénarios devraient être mis en place dans un développement futur de notre outil de simulation.

## CHAPITRE 6 : SIMULATIONS ET VALIDATION

Vérification de l'extensibilité du prototype : étude de cas pour le paramètre visibilité

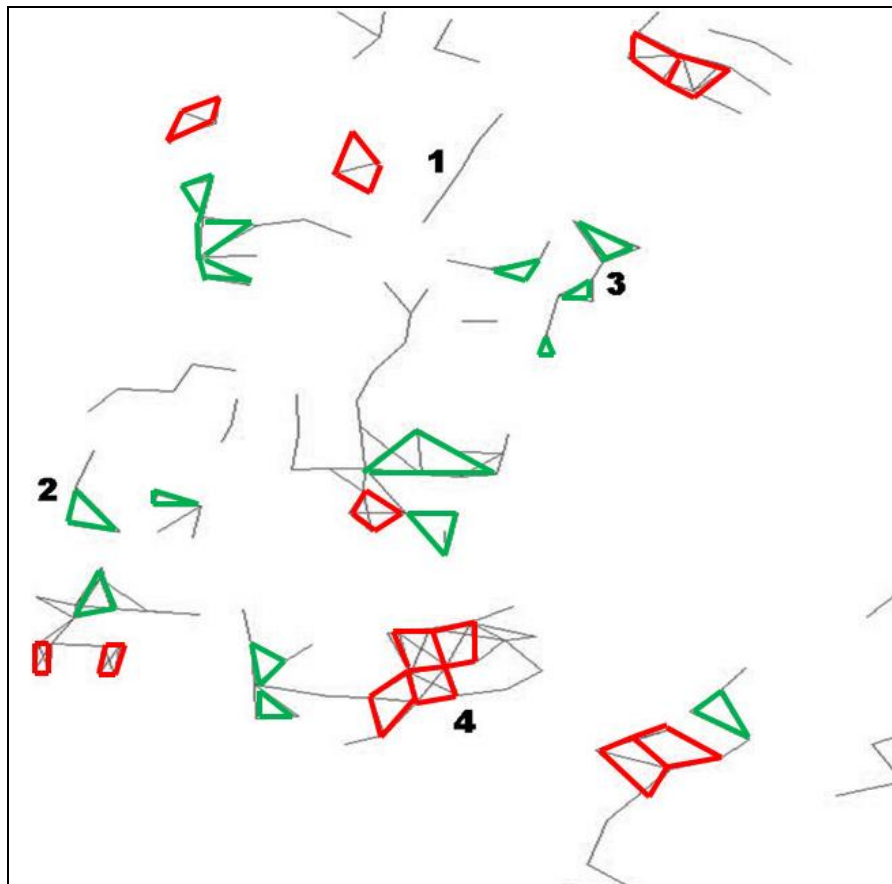


Figure 78: Groupes d'Habitats dans la commune de Chavannes-Près-Renens. On note la présence de groupes de 3 (en vert) et 4 (en rouge) bâtiments.

Malgré tout notre prototype à été validé vis-à-vis des besoins fondamentaux des architectes qui sont de disposer d'un outil de représentation dynamique de certains processus urbains même si cet outil doit encore faire l'objet d'un perfectionnement.

### 6.4 Vérification de l'extensibilité du prototype : étude de cas pour le paramètre *visibilité*

Ce paragraphe a pour objectif de montrer que notre prototype peut, dans une certaine mesure, être étendu en fonction du contexte. Par exemple il est possible d'intégrer un paramètre tel que la *visibilité* dans notre système de simulation. Dans le cadre de notre recherche il est pertinent d'intégrer le paramètre *visibilité* étant donné que la métropole lausannoise se trouve dans la région lémanique et que les bâtiments qui s'y trouvent possèdent une vue potentielle sur le lac Léman, qui est un objet à fort pouvoir symbolique.

Dans notre étude de cas on a réalisé des simulations avec le prototype développé *avec* et *sans* le paramètre de *visibilité* dans une zone pilote située près de la ville de Lausanne. Pour les données de visibilité, on a utilisé le système LIDAR et ces données ont ensuite été traitées avec TerraScan [Carneiro

## CHAPITRE 6 : SIMULATIONS ET VALIDATION

### Vérification de l'extensibilité du prototype : étude de cas pour le paramètre visibilité

et al, 2008]. MATLAB a servi à programmer des algorithmes pour établir les valeurs de visibilité et Manifold a servi à l'analyse spatiale des données, exportées ensuite au format *shape* dans PostGIS. Cette approche nous a permis en outre de déterminer la faisabilité et le potentiel des données LIDAR pour d'éventuelles autres extensions de notre prototype.

La *visibilité* sur le lac depuis un bâtiment se trouvant dans notre zone test est montrée à la fig. 79.

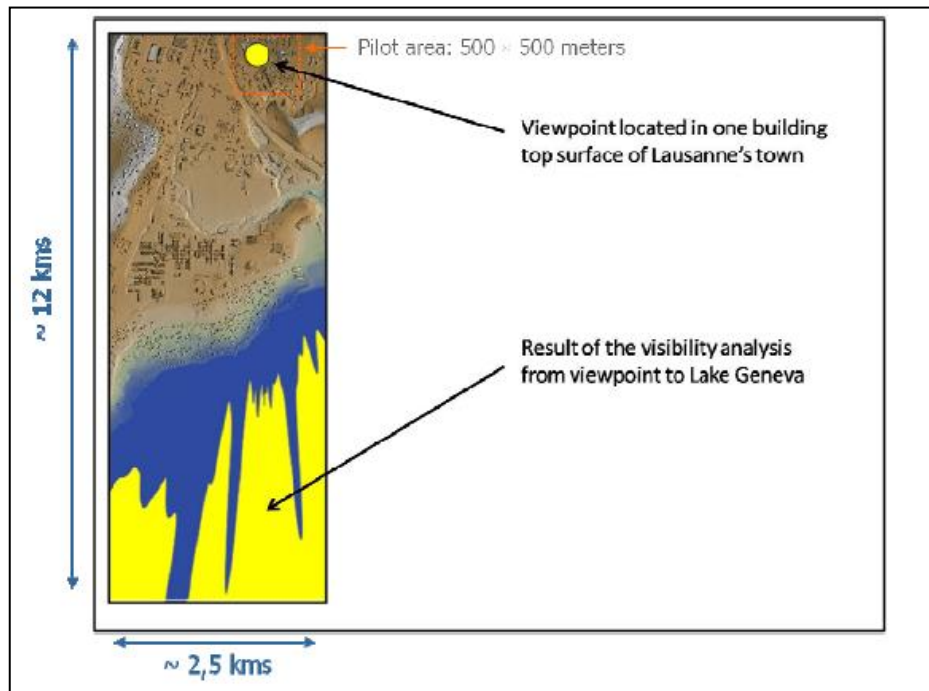


Figure 79: Visibilité sur le lac depuis le toit d'un bâtiment se trouvant dans notre zone de test

La fig. 79 montre la visibilité d'un bâtiment pour un angle relativement étroit. Ce choix s'explique par le fait que le temps de calcul est relativement élevé. En outre le calcul de visibilité se fait de manière indépendante de notre plateforme de simulation. Il faudrait intégrer le calcul de visibilité dans notre système sous forme d'algorithme permettant un calcul automatique de la visibilité.

Afin de créer de nouveaux bâtiments, deux simulations (avec et sans intégrer le paramètre de visibilité) ont été réalisées dans la même zone d'étude dans la commune de Chavannes. Les logements (représentés par les rectangles jaunes) ont été créés pour les besoins de la démonstration. Les valeurs de visibilité ont été calculées à partir de quelques points distribués dans notre zone d'étude, et les valeurs de visibilité à partir des points manquants ont été extrapolées. Les résultats visuels 2D de la simulation sont montrés à la fig. 80.

De l'analyse de la fig. 76 on peut vérifier que l'impact de la visibilité sur les résultats est significatif. Les deux bâtiments (en jaune) mis en évidence par un cercle rouge sont des bâtiments dont la visibilité sur le lac est importante à l'emplacement de la seconde simulation, donc ils viennent se placer de préférence à cet endroit-là. La localisation des autres bâtiments ne varie pas entre les deux simulations (ils pourraient en effet venir se placer près des deux bâtiments entourés par le cercle rouge...) car la visibilité est un

## CHAPITRE 6 : SIMULATIONS ET VALIDATION

### Vérification de l'extensibilité du prototype : étude de cas pour le paramètre visibilité

facteur moins important que l'influence des autres bâtiments à proximité (école notamment, grand bâtiment en vert sur la figure).

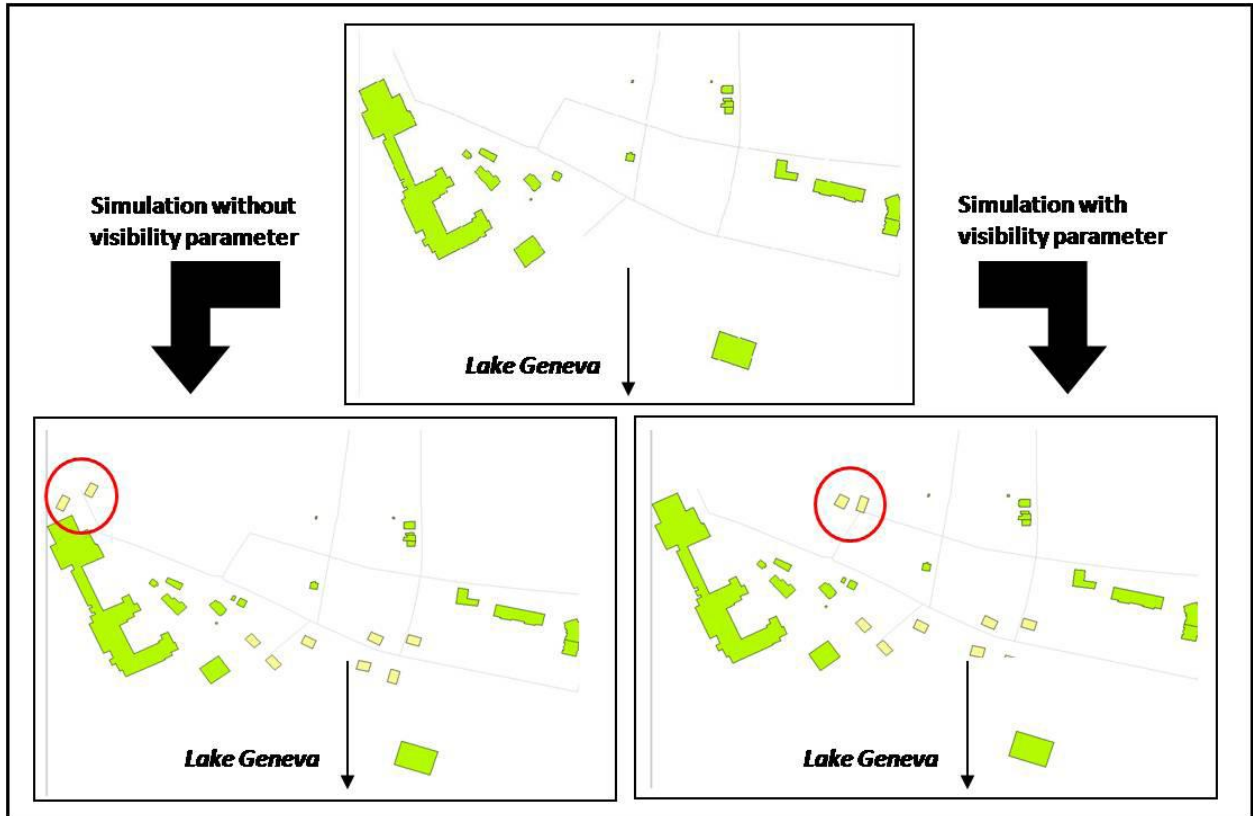


Figure 80: Simulation sans (gauche) et avec (droite) le paramètre *visibilité* (NB : la figure en bas à droite comporte un défaut de représentation : un bâtiment en jaune a été occulté)

Pour obtenir ces résultats nous avons attribué un poids très important au paramètre *visibilité*. Même si cela semble artificiel, nous avons fait ce choix avant tout pour montrer que certains facteurs environnementaux peuvent jouer un rôle de premier plan dans l'organisation de la croissance du milieu urbain construit, et cela est en accord avec les hypothèses des architectes concernant l'organisation urbaine.

Les résultats de l'impact de la visibilité sur le *Degré de Satisfaction* sont donnés à la fig. 81.

Cette analyse nous a amené à conclure qu'un bâtiment peut posséder un DS plus bas qu'un autre (voir l'exemple des bâtiments no 1 et no 14) si le paramètre de *visibilité* n'est pas considéré et inversement. Ces résultats semblent suggérer que le paramètre de *visibilité* peut avoir une influence sur la façon dont la métropole lausannoise s'auto-organise, si l'on admet que le *Degré de Satisfaction* (qui reflète les postulats des architectes) est un paramètre important pour la localisation des agents représentant les bâtiments et par conséquent qu'il est un paramètre important dans le processus de création des formes urbaines.



## CHAPITRE 6 : SIMULATIONS ET VALIDATION

Vérification de l'extensibilité du prototype : étude de cas pour le paramètre visibilité

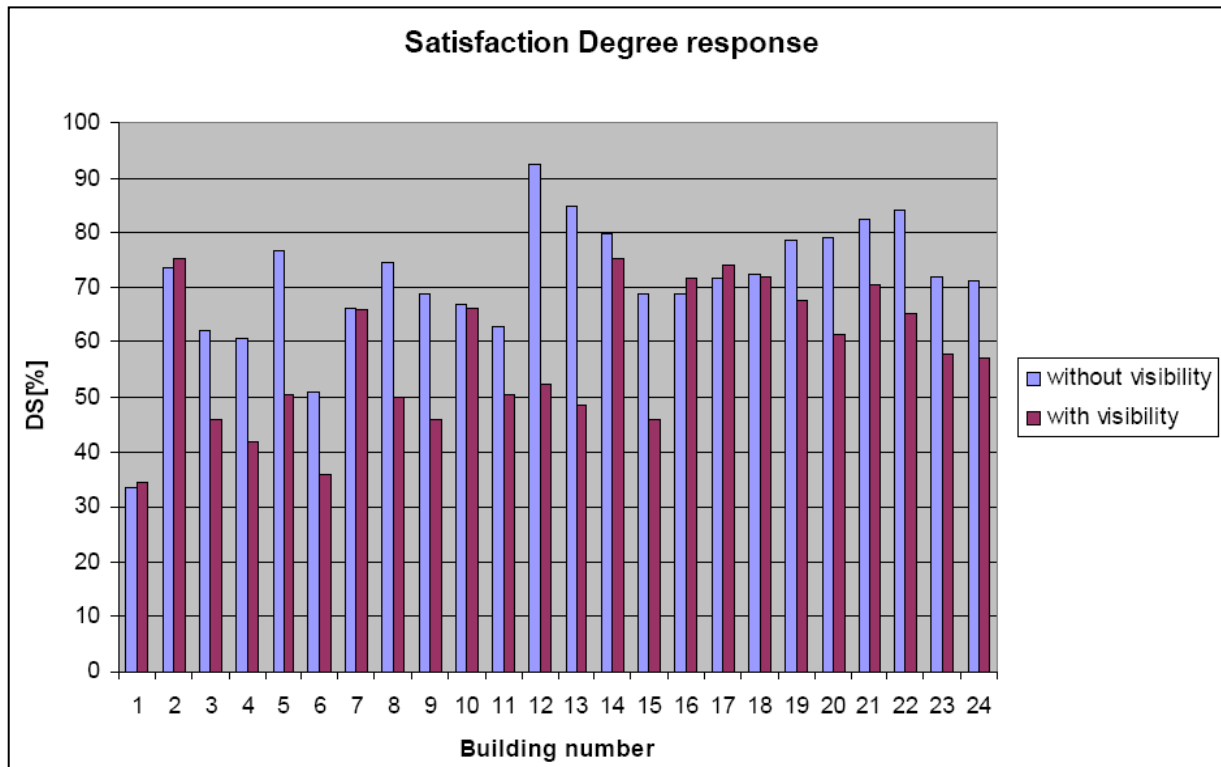


Figure 81: Degré de Satisfaction des bâtiments avec et sans le paramètre de visibilité

La différence importante entre les deux simulations s'explique par le fait que l'on a choisi une valeur élevée pour le coefficient de *visibilité*. C'est un choix de modélisation qui reflète les caractéristiques du site choisi pour l'étude : c'est une zone située le long d'un lac ayant un impact paysager. En effet, il est communément admis (selon les architectes) que, dans la région se trouvant le long du lac Léman, la vue sur le lac est un facteur important qui détermine la satisfaction des personnes habitant dans les zones résidentielles.

D'après les résultats ci-dessus on a pu se rendre compte de l'importance du facteur de *visibilité* sur la dynamique de la morphogenèse. Par conséquent l'utilisation de données de grande précision telles celles dérivant du système LIDAR s'avère primordiale.

L'utilisation de données LIDAR permet l'implémentation rapide et précise d'indicateurs urbains 3D, tels que la *visibilité* et l'*exposition solaire*, destinés à des applications variées. L'utilisation de ce type de données en simulation urbaine peut rapidement fournir des résultats et des analyses sur l'évolution de la forme de la ville à des utilisateurs se trouvant au-delà du champ de la géomatique, tels les urbanistes et les responsables de la planification territoriale.

## CHAPITRE 6 : SIMULATIONS ET VALIDATION

### *Approche de validation future du prototype*

Cette étude de cas est surtout intéressante pour montrer l'impact sur la dynamique de la morphogenèse urbaine d'un paramètre pouvant être compris comme un facteur d'influence au même titre que l'influence fonctionnelle entre bâtiments. Dans des travaux futurs il sera intéressant d'intégrer dans le prototype d'autres types de facteurs et de déterminer leur pertinence et leur impact sur la création des formes urbaines. Ce type d'analyse pourrait éventuellement remettre en question, valider ou enrichir certaines hypothèses des architectes sur les lois de la morphogenèse et posées comme postulats au début de ce travail de recherche. On remarque ainsi que les simulations réalisées avec notre prototype peuvent venir modifier ou enrichir notre modèle de départ.

## 6.5 Approche de validation future du prototype

### 6.5.1 Approche de validation quantitative

L'étape suivante de validation à planifier est de nature plus « quantitative » (par opposition à une validation par les formes créées, qui représenterait un aspect plus qualitatif). En effet comme observé ci-dessus on observe la création de formes représentatives de *Groupes d'Habitats* mais on ne sait pas encore comment ces formes se créent à un endroit déterminé du territoire. Ainsi il faudrait vérifier que des formes particulières se créent à un endroit donné, plus ou moins étendu, défini par un « buffer », même si elles ne sont pas forcément orientées de manière conforme à la réalité. En d'autres termes il faudrait pouvoir vérifier que des formes représentatives (groupes d'habitat) se créent à des emplacements déterminés. Cette approche de validation est illustrée à la fig. 82. Elle montre l'emplacement réel d'un groupe de bâtiments de type logement (en vert) et le groupe existant (en orange). La distance entre les centres de gravité des deux groupes est symbolisée par la flèche rouge. La création des bâtiments de logements par la simulation sera ainsi plus ou moins proche de la réalité en fonction de cette distance qui représente l'aspect « quantitatif » de la validation.

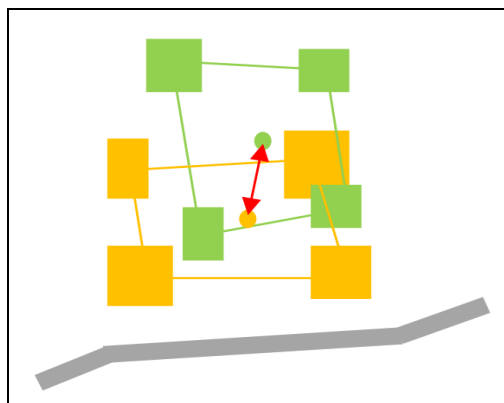


Figure 82: Approche quantitative de validation

Cette approche de validation quantitative pourra notamment faire l'objet d'un travail de recherche qui permettrait de déterminer jusqu'à quel point les « outputs » notre simulateur sont représentatifs de la réalité géographique urbaine.

## CHAPITRE 6 : SIMULATIONS ET VALIDATION

### *Approche de validation future du prototype*

#### **6.5.2 Validation du prototype par les utilisateurs**

L'utilisation sur le long terme du prototype développé permettrait de valider ou d'invalider les hypothèses de la morphogenèse urbaine. Il permettrait en outre de redéfinir certaines règles comportementales des agents et d'aboutir à une meilleure modélisation des objets urbains qu'ils représentent. On pourrait également, lors de cette phase d'évaluation, définir de nouveaux scénarios d'interaction qui nous permettraient de prendre en compte toute la complexité des processus urbains. Faute de moyens, cette validation par les utilisateurs n'a pas pu être mise en œuvre.

Néanmoins le prototype ne pourra jamais refléter absolument la réalité observée, car comme tout modèle il n'est que la transcription de la réalité et non la réalité elle-même. Dire d'un modèle qu'il est valide (dans notre cas le simulateur) signifie qu'il se comportera avec une précision satisfaisante dans le cadre de son domaine d'application et en accord avec les objectifs de la modélisation. La validation d'un modèle est ainsi fortement dépendante de la construction du modèle lui-même. Le domaine d'application est l'ensemble des conditions jugées appropriées pour lesquelles le modèle a été testé [Schlesinger et al, 1979]. La validation du modèle est réalisée en comparant le comportement du modèle avec le comportement du système avec les mêmes conditions d'entrée initiales. Un modèle peut être suffisamment valide selon un certain ensemble de données d'entrée initiales et complètement absurde dans un autre [Zeigler, 1976]. Dans notre cas, étant donné que les conditions initiales peuvent former un ensemble relativement large (étant donné la complexité des processus urbains) on a opté pour une technique de validation plus subjective que statistique [Balci & Sargent, 1984], d'où notre choix de validation à l'échelle méso.

Ainsi si un modèle ne reflète pas exactement la réalité observée, cela ne veut pas dire qu'il ne sera pas valide pour autant, étant donné qu'un modèle est valide s'il respecte les critères de validation formulés en début de modélisation. Ainsi il est important de définir de bons critères de validation et les critères

## **CHAPITRE 6 : SIMULATIONS ET VALIDATION**

*Le prototype développé peut-il servir à vérifier l'impact d'un programme architectural sur la dynamique urbaine ?*

concernant la formation des groupes urbains nous ont semblé des critères pertinents dans le cadre de ce travail de recherche.

### **6.6 Le prototype développé peut-il servir à vérifier l'impact d'un programme architectural sur la dynamique urbaine ?**

On veut montrer ici l'impact d'un programme architectural sur la morphogenèse urbaine. La capacité à simuler l'impact d'un programme architectural sur la dynamique urbaine s'avère primordiale dans une perspective de planification stratégique du milieu urbain.

Ce scénario élémentaire présenté ici n'a pas été validé, mais il illustre une tendance générale de l'organisation urbaine. Pour le valider il faudrait simuler l'impact d'un programme réel. On montre ce scénario afin de présenter ce qu'il serait possible de faire avec le simulateur.

#### **6.6.1 Premier exemple de simulation**

##### **a) Scénario impact de programme : avec programme**

Dans ce premier exemple de simulation, on simule la croissance urbaine dans la zone de Chavannes-Près-Renens avec un programme architectural, comprenant notamment des restaurants, des boutiques,

des cafés et des commerces (fig.83). On remarque que les bâtiments créés (logements) ont tendance à se placer à proximité des services.

## CHAPITRE 6 : SIMULATIONS ET VALIDATION

*Le prototype développé peut-il servir à vérifier l'impact d'un programme architectural sur la dynamique urbaine ?*

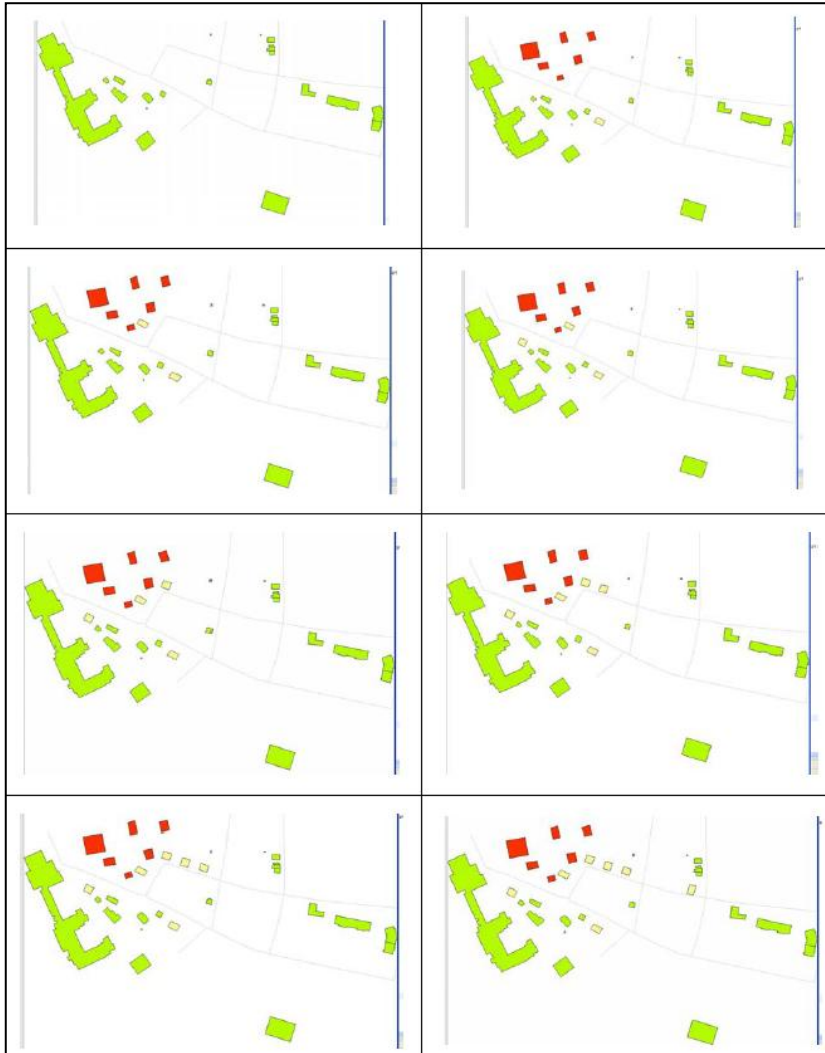


Figure 83: Simulation avec impact de programme

### c) Scénario impact de programme : sans programme

Cette fois la simulation est lancée sans programme architectural. Le résultat diffère grandement de la première simulation : d'une part les bâtiments commencent par se créer à des emplacements différents et d'autre part la configuration finale de ces derniers est également différente (fig.84).

## CHAPITRE 6 : SIMULATIONS ET VALIDATION

*Le prototype développé peut-il servir à vérifier l'impact d'un programme architectural sur la dynamique urbaine ?*

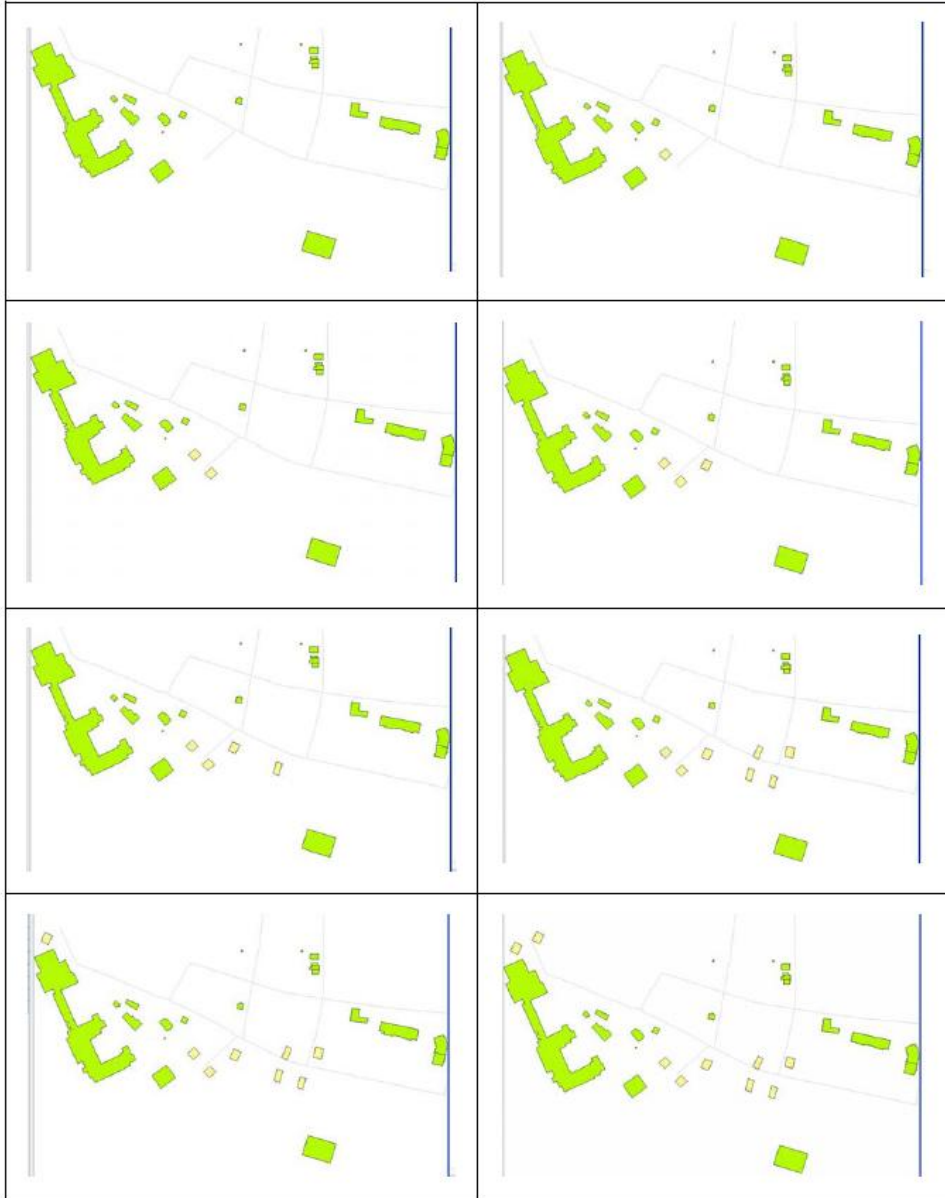


Figure 84: Simulation de la croissance urbaine sans programme architectural

### a) Scénario impact de programme : avec programme

Le programme architectural se compose d'un groupe de quatre bâtiments de type boutique, supermarché, centre commercial et restaurant (fig.85). Il est implanté dans la zone d'étude au début de la simulation. Cela représente les conditions initiales du système. Ensuite les logements sont créés les uns après les autres (fig.85).

## CHAPITRE 6 : SIMULATIONS ET VALIDATION

*Le prototype développé peut-il servir à vérifier l'impact d'un programme architectural sur la dynamique urbaine ?*

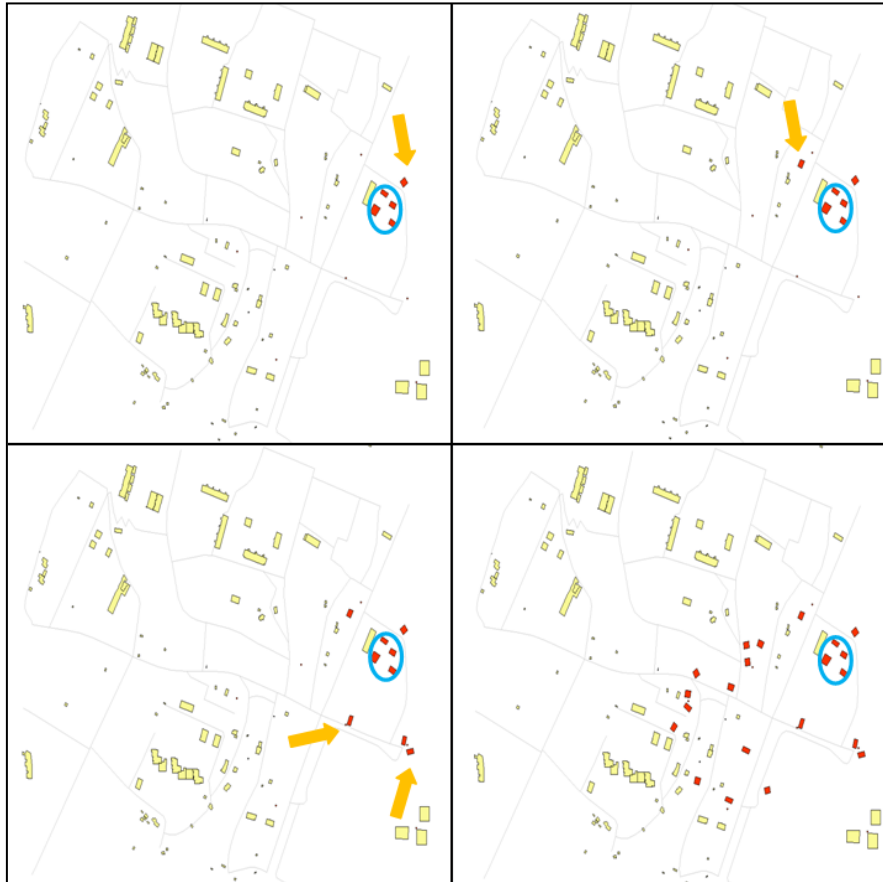


Figure 85: Impact d'un programme architectural (entouré de bleu) sur la croissance des bâtiments de type logement (flèches orange).

### b) Scénario impact de programme : sans programme

Une autre simulation est réalisée sans le programme architectural. Le résultat est montré à la fig. 86. On peut remarquer qu'il est très différent du premier résultat. Les bâtiments commencent par se créer à un autre emplacement et le résultat final est également différent.

Ce type de résultat peut être applicable dans le cadre d'une planification urbaine stratégique, car le choix de l'emplacement d'un programme architectural peut déterminer l'organisation du développement urbain dans sa proximité.

## CHAPITRE 6 : SIMULATIONS ET VALIDATION

### Discussion du modèle multi-agents

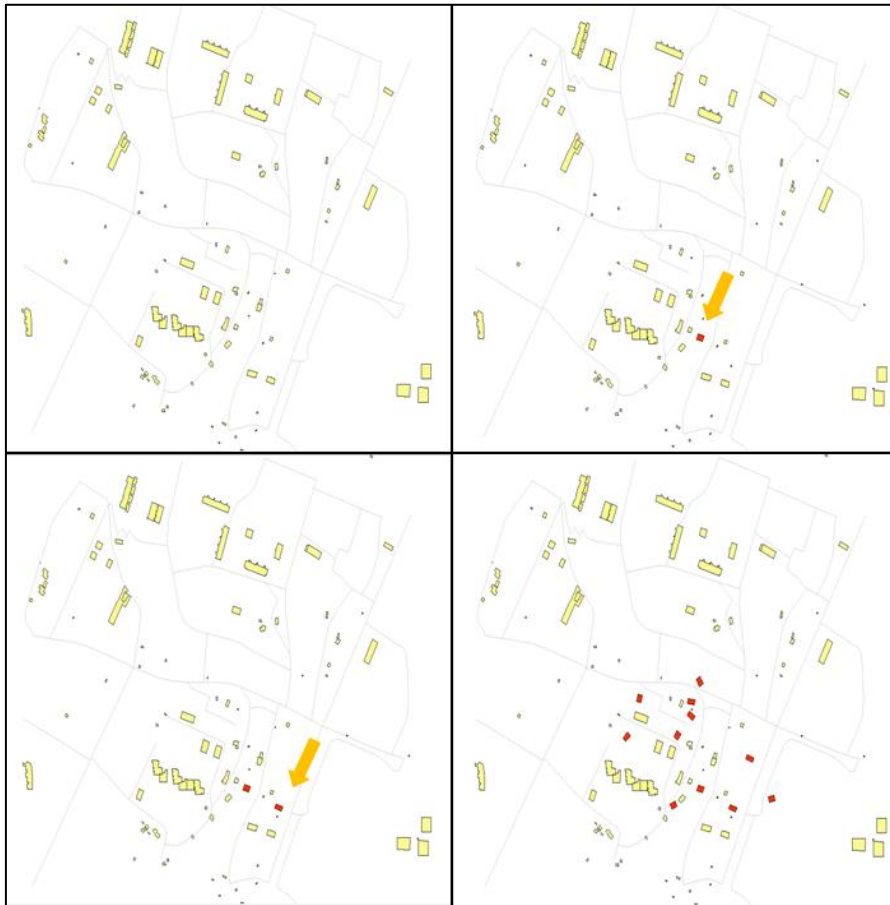


Figure 86: Croissance des bâtiments de type logement sans impact d'un programme

## 6.7 Discussion du modèle multi-agents

Ce paragraphe a pour objectif de déterminer la nature des agents que l'on a utilisés pour la conception de notre simulateur. Notamment il discute dans quelle mesure les classes Java que l'on a développées peuvent être considérées comme des agents.

Pour réaliser notre prototype nous nous basés sur les principes de conception des systèmes multi-agents. L'environnement de développement a été GeOxygene qui n'est pas une plateforme de développement multi-agents mais une librairie permettant des traitements géomatiques à partir d'une base de données.

Pour rappel et selon [Wooldridge & Jennings, 1995] un agent est une entité autonome, sociable, réactive et pro-active. Nos agents peuvent être considérés comme autonomes dans la mesure où ils prennent des décisions (par exemple la décision de se créer à un endroit donné en fonction de leur *Degré de Satisfaction* suite à une interaction avec un autre agent). Ils sont sociables car ils interagissent entre eux au moyen d'un langage défini et échangent de l'information ou demandent l'exécution d'une action. Ils sont réactifs dans la mesure où ils perçoivent leur environnement et sont capables de réagir à ses



## CHAPITRE 6 : SIMULATIONS ET VALIDATION

### *Le système développé est-il pertinent ?*

changements (voir par exemple la création d'une école avec l'arrivée de nouveaux habitants dans le territoire). Enfin ils sont pro-actifs car par exemple ils sont capables de montrer un comportement orienté vers la réalisation d'un objectif (voir notamment la création de l'école par la Commune).

En fonction de toutes ces caractéristiques les objets logiciels que l'on a développés peuvent être considérés comme des agents. Néanmoins il faut mentionner que l'on a fait évoluer les agents *sous contraintes*. En effet pour la modélisation de nos scénarios d'interaction ont a dû contraindre les agents à réaliser tel ou tel type d'action. Leur autonomie est ainsi grandement limitée et leur seul libre arbitre résidait dans leur *Degré de Satisfaction* et leurs règles comportementales. En outre dans les scénarios modélisés les actions sont réalisées les unes après les autres jusqu'à la conclusion finale. Le déroulement des actions se fait de manière événementielle (simulation par événements), dans le sens où la réalisation d'une action nous permet de passer à l'action suivante.

D'après nos remarques ci-dessus on peut en déduire que nos entités logicielles montrent des caractéristiques d'agents sans répondre de façon rigoureuse à la définition. Cet état de fait est en partie lié à faiblesse de la définition d'un agent et du manque de consensus à son égard. En outre il est à noter qu'en fonction d'autres définitions qui sont proposées pour les agents, nos entités sont moins à même de les satisfaire. Notamment certains auteurs [Franklin et Graesser, 1996] mettent en avant la notion de continuité temporelle des actions. Or, nos agents ne sont pas en permanence « en exécution » car ils sont activés les uns après les autres, excluant ainsi la possibilité d'actions parallèles.

Pour conclure nous pensons que nos entités logicielles peuvent plutôt être définies comme des entités intelligentes distribuées pouvant modéliser un certain nombre de processus à l'œuvre dans le milieu urbain. Dans ce sens leur nature est aussi adaptée au problème à résoudre et présente de ce fait un faible degré de généralité. L'accent a plutôt été mis dans la compréhension des processus urbains plutôt que dans le respect absolu d'une démarche de conception qui en réalité n'existe pas ou est trop générale [Michel, 2004].

### **6.8 Le système développé est-il pertinent ?**

Notre système peut d'ores et déjà être utilisé pour comprendre les processus urbains dans leur aspect qualitatif. Les perspectives de développement futur sont ainsi relativement intéressantes. Néanmoins il nécessite de nombreuses améliorations, notamment dans la conception des agents. En effet leur comportement n'a pas été formalisé de façon complète et ils ne montrent pas suffisamment d'autonomie. En outre à l'avenir il faudra inclure d'autres paramètres tels que des flux de population, de biens ou de matières dans le système si l'on veut prétendre à l'exhaustivité.



## CHAPITRE 7 :

### CONCLUSION ET PERSPECTIVES

*Ce chapitre présente les principales conclusions à notre travail, les caractères innovants ainsi que les perspectives de recherche.*

#### 7.1 Synthèse

Au cours de notre recherche nous avons conçu un prototype de simulation simple basé sur les agents vecteurs multi-échelles pour la simulation de la morphogenèse urbaine. Cette approche de modélisation de l'urbain permet notamment de simuler la formation de groupes d'habitats et de les détecter. Cette approche est novatrice dans le domaine de la simulation urbaine et peut déboucher sur de nouvelles manières de comprendre et planifier la ville.

On a désormais à notre disposition un outil qui nous permet de représenter et de comprendre certains processus urbains, notamment la dynamique des groupes d'habitats. Cet outil leur permet en outre d'évaluer l'impact d'un programme architectural et d'envisager à terme une planification plus maîtrisée et stratégique de l'espace urbain. En outre les outils SIG sont relativement peu répandus dans le domaine de la planification urbaine. Ainsi avec ce type d'outil les architectes et urbanistes pourraient exploiter le potentiel d'un SIG dans leurs domaines d'expertise et de recherche : leurs hypothèses sur la théorie urbaine pourraient être validées et enrichies par l'utilisation de moyens informatiques intégrant des bases de données géographiques ainsi que des algorithmes. Pour que ce type d'application devienne effectif il faudrait développer un cadre de recherche faisant intervenir des compétences en architecture et des compétences informatiques pour aboutir à un système de simulation qui serait alimenté par des lois et d'autres paramètres fournis par des architectes et dont le développement serait réalisé par des moyens informatiques incluant des SIG (fig.87).

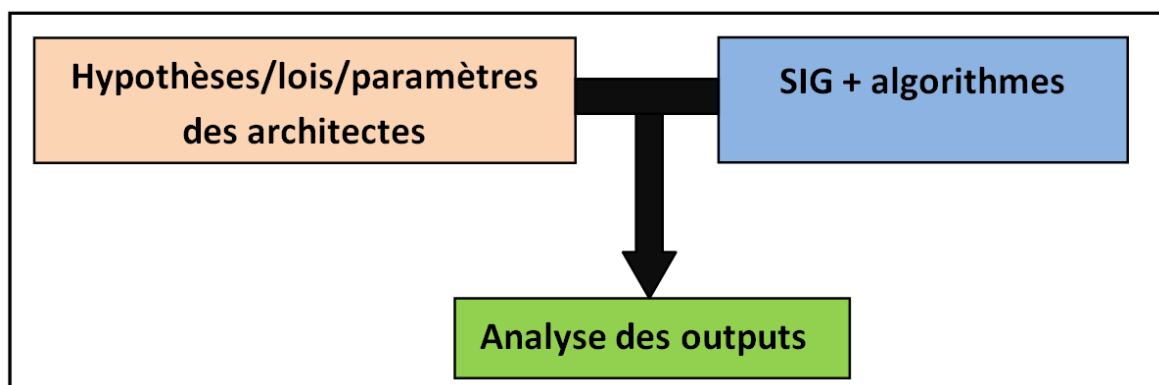


Figure 87: Système de recherche sur le développement urbain intégrant l'architecture et les SIG

## CHAPITRE 7 : CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

### *Caractères innovants*

## 7.2 Caractères innovants

D'après notre état de l'art dans le domaine de la simulation urbaine, le prototype multi-agents développé est le premier *en son genre*, dans le sens où il prend en compte la géométrie vectorielle des objets du territoire urbain et notamment la géométrie des bâtiments et qu'il permet de simuler leur interaction en ayant recours aux méthodes de l'intelligence artificielle distribuée. En outre il offre une nouvelle représentation de la ville (modélisée comme un système complexe), basée sur une représentation dynamique vectorielle multi-échelle.

En outre cette nouvelle approche de modélisation de l'espace géographique pourrait également apporter des changements intéressants aux modèles SIG classiques, notamment par la prise en compte des aspects dynamiques de l'espace géographique.

## 7.3 La nécessité d'utiliser une telle approche pour mieux maîtriser la dynamique urbaine

En raison de la forte croissance de la population, le développement des villes actuelles devient incontrôlable. L'extension des villes est désorganisée et cause de sérieux problèmes à leurs habitants. Dès lors il est souhaitable de fournir un effort de recherche et de développement pour optimiser l'implantation de nouveaux programmes architecturaux afin de maîtriser la croissance urbaine.

Pour des systèmes aussi complexes que les villes, planifier sans avoir comment les activités et les interactions spatiales seront changées est un exercice futile [Benenson et al, 2001], [Hammam et al, 2003]. La plupart des outils avec lesquels nous étudions la ville aujourd'hui sont déficients dans leur capacité à simuler et décrire de façon complète le caractère changeant de l'espace urbain [Hammam et al, 2003]. Il y a un besoin réel de modèles qui soient flexibles et dynamiques dans leurs capacités de simulation comme les villes dans leur capacité d'évolution [Batty et Torrens, 2000]. Il existe un grand potentiel d'évolution de la modélisation urbaine si l'on considère les technologies récentes [Hammam et al, 2003]. Notre prototype de simulation s'inscrit notamment dans cette évolution de la modélisation urbaine. En effet l'intégration de la modélisation vectorielle des objets spatiaux et des systèmes multi-agents offre une manière plus réaliste de simuler les comportements urbains et constitue à ce titre une évolution par rapport aux modèles de simulation classiques.

## 7.4 Limites du prototype développé

Le prototype de simulation développé intègre une théorie urbaine (les postulats de la recherche), des données et des algorithmes (communication entre agents et détection de groupes urbains) pour aboutir à une représentation abstraite de la métropole et de son fonctionnement.

Idéalement une fois que notre simulateur a été validé, il devrait pouvoir être utilisé pour comprendre le développement de la métropole. Malheureusement comme tout modèle il comporte des limites liées à

## CHAPITRE 7 : CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

### *Problèmes généraux rencontrés*

son degré d'abstraction des processus urbains [Hammam et al, 2003] et notamment celle de fournir essentiellement des résultats qualitatifs.

En réalité le prototype doit plutôt pour l'instant être utilisé pour évaluer les résultats de planifications architecturales qui affectent la métropole et comme un laboratoire virtuel pour tester des hypothèses concernant la dynamique urbaine. L'intérêt de recourir à un environnement virtuel tel que le notre, intégrant des agents autonomes en interaction, est de réaliser des expériences impossibles ou très difficiles à faire dans la réalité et où la modélisation classique rencontre des limites [Treuil et Mullon, 1997].

En outre, de manière générale, notre modèle est le résultat de connaissances cristallisées provenant d'une collaboration interdisciplinaire et d'une reconstruction de la réalité de la dynamique de l'espace urbain aboutissant à une représentation abstraite. La prétention à faire vivre un espace géographique complexe tel qu'une métropole dans un environnement virtuel nous expose à tomber dans certains travers rencontrés en modélisation classique, notamment dans celui du modélisateur qui s'attache davantage à la beauté formelle du modèle qu'à la réalité de l'observation [Treuil et Mullon, 1997]. Cette critique peut surtout être pertinente en ce qui concerne les lois de morphogenèse admises comme postulats au début de cette recherche et sur lesquelles s'est appuyée la conception de notre prototype. La conception du prototype a pu ainsi être biaisée par des hypothèses qui ont fortement conditionné son développement. C'est une difficulté liée au caractère interdisciplinaire de cette recherche.

Les remarques ci-dessus soulèvent de manière générale des questions liées à la reproduction de phénomènes réels sur des environnements virtuels et notamment celle de savoir si de tels environnements sont pertinents pour modéliser de tels phénomènes et s'ils ouvrent une voie intéressante et novatrice dans leur compréhension [Treuil et Mullon, 1997].

## 7.5 Problèmes généraux rencontrés

Au cours de cette thèse un certain nombre de problèmes ont été rencontrés qui ont plus ou moins ralenti son avancée et qui nous ont parfois obligé à redéfinir certains de nos objectifs.

### 7.5.1 Manque de données

Le nombre de scénarios concernant des interactions entre objets (agents) du territoire n'était de loin pas suffisant pour permettre de définir de façon exhaustive le comportement d'un agent tel qu'un *Bâtiment*, une *Commune* ou un *Groupe d'Habitats*. On aurait souhaité avoir à disposition une liste exhaustive de comportements afin que les agents puissent répondre à un large éventail d'interactions. Cet état de fait ne nous a pas permis d'établir une validation plus large de notre prototype.

### 7.5.3 Problèmes liés à la plateforme GeOxygene

De manière générale la plateforme GeOxygene a été très difficile à prendre en main. Notamment elle montrait des signes d'instabilité au début du projet mais qui se sont résolus par la suite.

## CHAPITRE 7 : CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

### *Perspectives de recherche*

#### 7.5.4 Temps de calcul des simulations

Le temps de calcul d'un bâtiment dans le territoire prend quelques minutes, dû aux calculs de distances notamment. Cela a été un facteur limitant qu'il faudra par la suite améliorer (notamment par l'utilisation en parallèle de plusieurs processeurs).

### 7.6 Perspectives de recherche

#### 7.6.1 Perspectives interdisciplinaires

Le prototype de simulation par agents multi-échelles que nous avons développé pour modéliser la morphogenèse de la métropole et sa dynamique constitue un outil alternatif prometteur pour l'aide à la compréhension des processus urbains, et cela par rapport à des outils de représentation et d'analyse utilisés traditionnellement. De plus de par son caractère novateur et son champ d'expérimentation interdisciplinaire, le prototype que nous avons développé possède un fort potentiel d'applications dans le domaine de la recherche urbaine.

Le prototype nous permet de simuler des processus à l'œuvre dans le milieu urbain de façon qualitative. Il peut d'ores et déjà être utilisé comme outil d'aide à la compréhension de la dynamique urbaine. Dans le futur, le simulateur développé devrait intégrer une approche plus globale de modélisation, notamment par l'intégration des dynamiques démographique, économique, ou encore des transports. Il pourrait également devenir un outil d'aide à la décision, notamment par sa capacité à simuler l'impact de programmes architecturaux sur le développement de la ville.

Notre prototype basé sur les agents vecteurs multi-échelles constitue une première approche de modélisation de l'urbain et de nombreuses recherches doivent encore être réalisées en vue de son amélioration.

L'état d'avancement du projet « Morphogenèse de la Métropole » est montré à la fig. 88 [Plazanet, 2008]. La présente thèse est représentée (en vert) par la *Modélisation AGENT* dans le *Chantier SIMULATION*. La thèse du doctorant J.-J. Park est représentée par les *Lois d'Optimisation* dans le chantier ARCHITECTURE. De manière générale et pour améliorer notre prototype de simulation, qui est le sujet de cette thèse, il faudrait approfondir les recherches dans :

- **Le chantier architecture** : pour les simulations et la validation du prototype il faudrait choisir des zones de test plus variées et plus étendues, notamment le long de l'arc lémanique, mais il faut pour cela avoir les données à disposition, notamment les fonctions (occupations des bâtiments). En outre il faudrait utiliser le prototype afin de tester et d'améliorer la formulation des lois de morphogenèse et fournir ainsi une validation mieux en accord avec les objectifs de la modélisation.

## CHAPITRE 7 : CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

### Perspectives de recherche

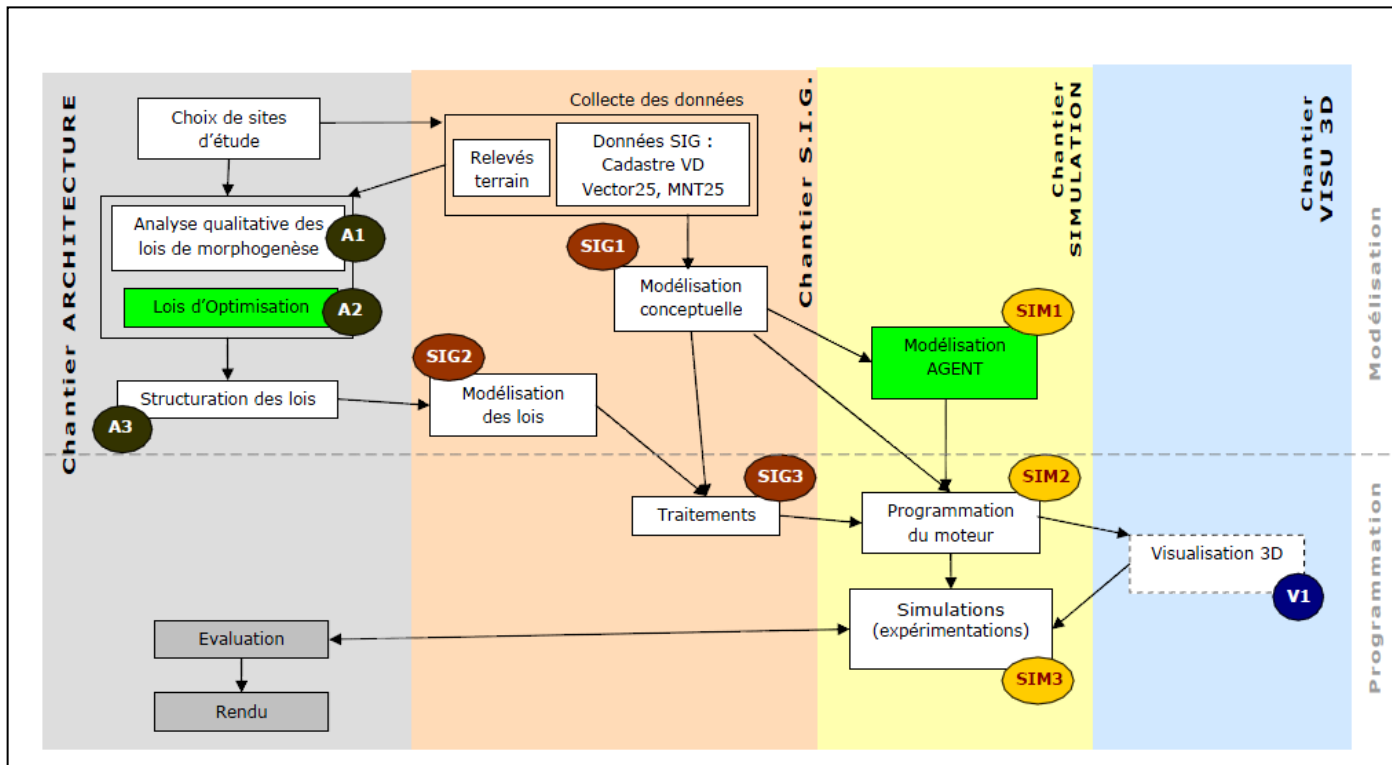


Figure 88: Etat de l'avancement du projet "Morphogenèse de la Métropole"[Plazanet, 2008]

- **Le chantier simulation et modélisation agent:** en ce qui concerne la programmation du moteur multi-agents, il faudrait modéliser plus exhaustivement (au niveau des règles comportementales) les agents eux-mêmes et leur comportement. En outre il faudrait développer d'autres scénarios de simulation afin de mieux prendre en compte la complexité des processus urbains.
- **Visualisation 3D :** un système de visualisation 3D en temps réel des résultats de la simulation reste encore à développer. En effet pour le moment les résultats de la simulation ne peuvent être visualisés qu'après la simulation et non en continu.

En fonction des résultats qui ont été obtenus durant le projet et les travaux qui restent encore à conduire, les recherches suivantes devraient être réalisées et pourraient permettre une amélioration du prototype développé en vue de ses applications futures:

#### 1. Validation du calcul du *Degré de Satisfaction*, détection et simulation de groupes urbains dans d'autres villes :

Le calcul du *Degré de Satisfaction* des agents à été étudié dans un contexte urbain bien précis. Il serait souhaitable, dans la perspective d'un développement ultérieur du prototype, de déterminer la « robustesse » d'une telle définition dans des contextes urbains relativement différents.

## CHAPITRE 7 : CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

### *Perspectives de recherche*

#### **2. Modélisation du comportement des agents de la manière la plus exhaustive possible afin de leur donner plus d'autonomie :**

La définition du comportement des agents est restée relativement simple. Certains types de réactions n'ont pas été intégrés dans les règles comportementales des agents. A l'avenir les architectes devraient définir clairement les objets du territoire et leur comportement afin qu'on puisse implémenter de la façon la plus complète possible les comportements des agents qui leur sont associés. En outre un plus grand échantillon de scénarios d'interaction devrait être mis à disposition par les architectes. Ces aspects ont été une source de difficultés dans le cadre de cette recherche interdisciplinaire.

#### **3. Développement d'une méthodologie automatique d'extraction de groupes urbains basée sur les indicateurs géométriques 2D et 3D dérivés de données LIDAR :**

Les algorithmes permettant l'extraction des groupes urbains ne sont pas automatisés. Il serait intéressant d'inclure une extraction automatique des groupes (qui représentent une structure urbaine à l'échelle méso) dans le cadre des scénarios de simulation, ce qui permettrait une interaction multi-échelle automatisée.

#### **4. Introduction de perturbations dans le système (catastrophes, variations brusques de la croissance de la population, etc.) et analyse de la réponse du simulateur :**

On n'a pas eu le temps de tester le prototype face à des situations « limites ». C'est un aspect important dans le cadre de la validation de notre simulateur.

#### **5. Définition d'une méthodologie d'extraction des systèmes urbains comparable à celles des groupes urbains :**

Il serait utile et intéressant d'étendre nos algorithmes d'extraction des groupes d'habitat à la détection des systèmes urbains, tels que présentés dans la thèse de J.-J. Park [Park, 2009].

#### **6. Elaboration d'un rendu visuel 3D dynamique intégrant différentes échelles de représentation :**

Etant donnée l'utilisation croissante de données géographiques 3D dans le domaine de la recherche urbaine, il serait intéressant de fournir un environnement de visualisation à notre prototype en intégrant notamment différentes échelles de représentation.

#### **7. Analyse géostatistique de données géographiques urbaines permettant d'aboutir à une formulation des lois de morphogenèse a priori statistiquement plus représentative :**

Les lois de morphogenèse fournies par les architectes ont été définies d'après leur expérience, mais elles n'ont jamais fait l'objet d'études statistiques rigoureuses. Il serait souhaitable si l'on veut obtenir plus de précision au niveau des outputs d'améliorer la précision des données d'entrée.



## CHAPITRE 7 : CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

### *Perspectives de recherche*

En outre, d'après [Plazanet, 2008], plusieurs doctorats pourraient être réalisés, à la croisée de plusieurs disciplines (fig. 89) ; notamment une exploration des lois de morphogenèse, le développement d'algorithmes d'extraction de structures spatiales (groupes, systèmes), une analyse géostatistique et une calibration du modèle et enfin une visualisation dynamique 3D multi-échelles.

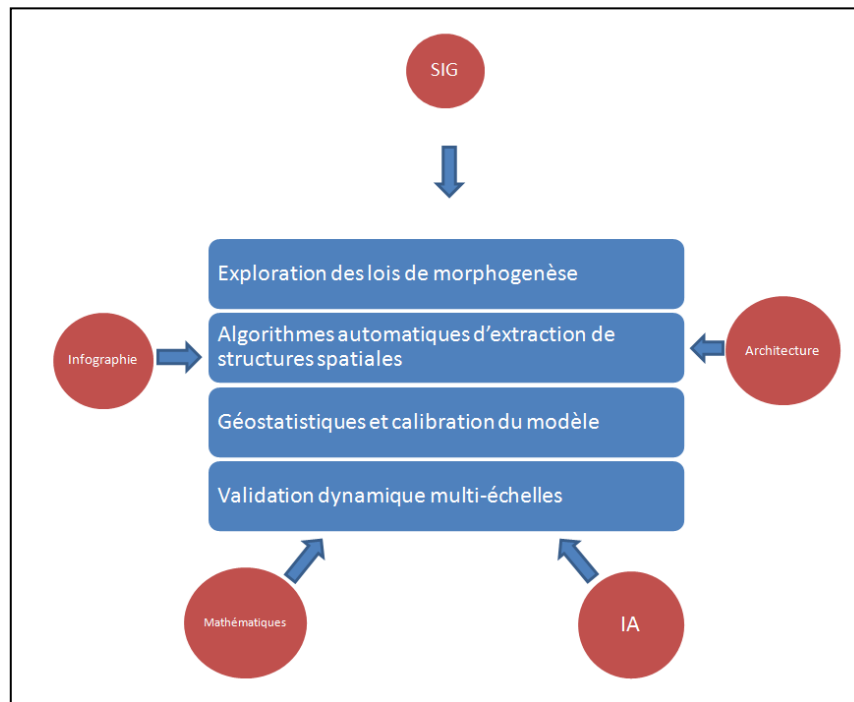


Figure 89: Sujets de doctorat possibles

### 7.6.2 Vers une plateforme générique de conception par agents vecteurs multi-échelles pour la simulation urbaine

La méthode de conception du système multi-agents présentée au chapitre 4 et 5 peut déboucher sur une méthode générale de conception de systèmes multi-agents pour la simulation urbaine. En effet le système urbain a été modélisé comme des agents en interaction et à des échelles différentes. Cette démarche de conception peut notamment être reprise dans d'autres conceptions de simulateurs urbains basées sur les systèmes multi-agents. Une formulation de ce modèle par un diagramme normalisé faciliterait la conception et l'évolutivité de la plateforme.

Les principes de modélisation suivants peuvent notamment être repris:

- **Modélisation multi-échelle** : ce principe de modélisation a déjà été introduit par d'autres chercheurs [Boffet, 2001] [Ruas, 2000]. Cette approche de modélisation est primordiale dans la modélisation des systèmes urbains car de nombreux processus dans les villes sont le résultat d'interactions multi-échelles.

## CHAPITRE 7 : CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

### *Perspectives de recherche*

- **Modélisation vecteur** : avec cette approche, les objets urbains peuvent être décrits dans leur aspect géométrique. Cette une description plus réaliste que par exemple l'approche par automates cellulaires.
- **Modélisation des composants du système urbain par des agents** : chaque objet du système urbain peut être décrit par un agent (cognitif ou réactif). Cette description peut intégrer la grande complexité des objets urbains.
- **Modélisation des interactions entre les agents** : la modélisation des interactions entre les agents proposée dans cette thèse est également originale et adaptée au contexte urbain. Bien qu'étant relativement simple, cette modélisation permet de prendre en compte la plupart des types d'interaction entre les agents associés aux objets urbains.

Cette approche de modélisation est relativement novatrice et peut déboucher sur de nombreuses applications en simulation urbaine. Elle peut être reprise en tant que démarche générique de conception multi-agents en simulation urbaine ou encore en géosimulation (fig.90).

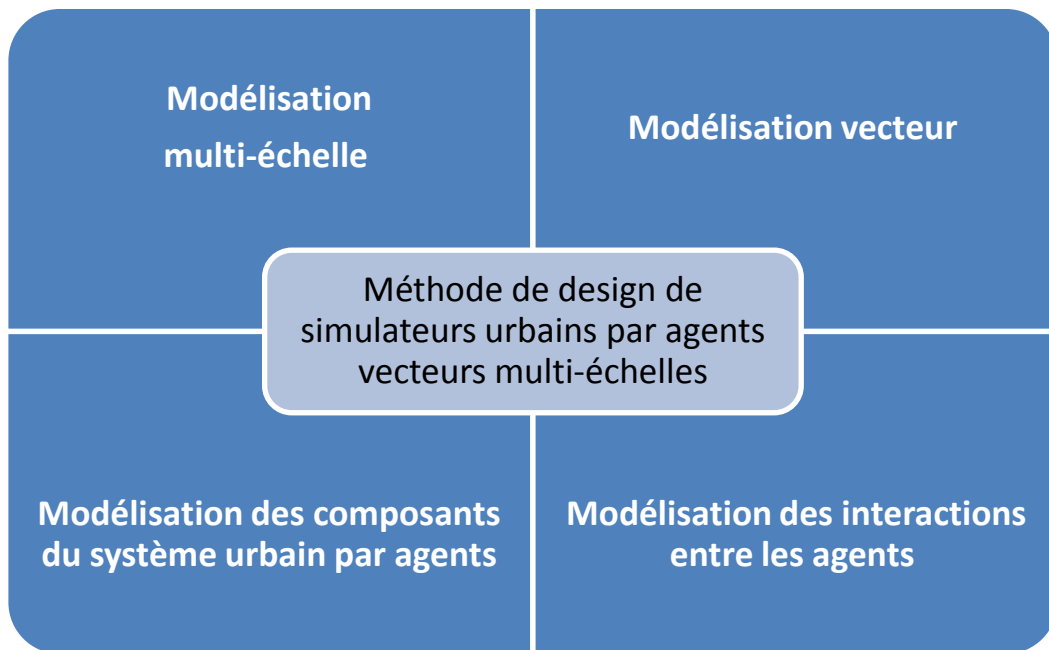


Figure 90: Méthode de design de simulateurs urbains par agents vecteurs multi-échelles

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

### REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Alexander, C., 2002-2005. *The nature of order : an essay on the art of building and the nature of the universe*. Vol.1, Berkeley, CA : Center for Environmental Structure.

Alexander, C., 1987. *A new theory of urban design*. New York : Oxford University Press.

Alexander, C. 1979. *The timeless way of building*. New York : Oxford University Press.

Antonini, G., Bierlaire, M., Weber, M., 2006. *Discrete choice models of pedestrian walking behavior*. Transportation Research Part B: Methodological. Volume 40, Issue 8, Pages 667-687.

Arentze, T., Timmermans, H.J.P., Janssens, D., Wets, G., 2006. *Modeling short-term dynamics in activity-travel patterns: from Aurora to Feathers*. In: Proceedings of the Innovations in Travel Modeling Conference, Austin, US, May 21–23.

Badard, T., Braun, A., 2004. *Oxygene: Une plate-forme ouverte pour le déploiement de services web géographiques*. Revue "Le Monde des Cartes" du Comité Français de Cartographie, n°181, septembre 2004, pp. 32-41.

Badard, T., Braun, A., Ruas, A., 2005. *Plate-forme GeOxygene, Guide utilisateur*. Projet GeOxygene, IGN.

Badariotti, D., 2005. *Des fractales pour l'urbanisme? Quelques pistes de réflexion à partir l'exemple de Strasbourg-Kehl*. Cahiers de Géographie du Québec. Volume 49, n° 137. Pages 133-156.

Bairoch P., 1985. *De Jéricho à Mexico : Villes et économie dans l'histoire*, Gallimard, Paris.

Balci, O., Sargent, R.G., 1984. *A bibliography on the credibility assessment and validation of simulation and mathematical models*. Simuletter 15, 3 (July), 15-27.

Basquiast, J.-P., 2004. *La morphogenèse*. Extrait du site web: Automates Intelligents. (<http://www.automatesintelligents.com/echanges/2004/jan/morphogenese.html>).

Batty, M., 2005. *Cities and complexity : understanding cities with cellular automata, agent-based models, and fractals*. Cambridge : MIT Press.

Batty, M., Chapman, D., Evans, S., Haklay, M., Kueppers, S., Shiode, N., Smith, A., Torrens, P.M., 2000. *Visualising the city: Communicating urban design to planners and decision-Makers*. CASA Working Paper 26. University College London, Centre for Advanced Spatial Analysis.

Batty, M., 1998. *Urban evolution on the desktop : simulation with the use of extended cellular automata*. Environment and Planning A, vol. 30, p. 1943-1967.

Batty, M., Jiang B., 1999. *Multi-agent simulation: new approaches to exploring space-time dynamics within GIS*, CASA Working Paper Series, UCL, London, 25p.

Batty, M., Longley, P., 1996. *Fractal Cities*. Academic Press, London and San Diego.

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

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Batty M., Fotheringham, A.S., Longley, P. A., 1993. *Fractal Geometry and Urban Morphology*. In : N.S. Lam and L. De Cola (Eds.), *Fractals in Geography*, Prentice Hall, Englewood Cliffs (NJ).
- Benenson, I., Aronovich, S., Noam, S., 2005. *Let's talk objects: generic methodology for urban high-resolution simulation*. In *Computers, Environment and Urban Systems* 29. 425–453.
- Benenson, I., Torrens, P., 2004. *Geosimulation: Automata-based modeling of urban phenomena*. John Wiley & Sons Ltd., Chichester, England.
- Benenson, I., Torrens, P.M., 2003. *Geographic Automata Systems: A new paradigm for integrating GIS and geographic simulation*. In: Proceedings of the 7<sup>th</sup> International Conference on Geocomputation, Martin, D. (Ed.). Southampton, GeoComputation CD-ROM.
- Benenson I., Aronovich, S., and Noam, S., 2001. *OBEUS: Object-Based Environment for Urban Simulation*. In Proceedings of the 6th international conference on GeoComputation, University of Queensland, Brisbane, Australia. 2001.
- Beni, G., Wang, J., 1989. *Swarm Intelligence in Cellular Robotic Systems*. Proceed. NATO Advanced Workshop on Robots and Biological Systems, Tuscany, Italy, June 26–30 (1989).
- Berger, P., Nouhaud, J.-P., 2004. *Formes cachées, la Ville*. Lausanne : PPUR.
- Berger, T., 2001. *Agent-based spatial models applied to agriculture: a simulation tool for technology diffusion, resource use changes and policy analysis*. *Agricultural Economics*, 25 (2-3):245-260.
- Boffet A., 2001. *Création et Analyse Multi-Niveaux des Espaces Géographiques en milieu urbain*, 5<sup>èmes</sup> rencontres Géographie Théorique et Quantitative (TheoQuant'01, 22-23 février, Besançon (France)).
- Borsboom-van Beurden, J.A.M., Van Lammeren, R.J.A., Hoogerwerf, T., Bouwman, A.A., 2006. *Linking Land Use Modelling and 3D Visualisation - A mission impossible?* In Proceedings: 8th International DDSS Conference. Innovations in Design & Decision Support Systems in Architecture and Urban Planning. Eindhoven University of Technology, The Netherlands. Jos P. van Leeuwen & Harry J.P. Timmermans Ed. pp. 85 – 95.
- Bourdin, A., Giband, D., Vanier, M., Halbert, L., Chalas, Y., Marconis, R., Merlin, P., Demaziere, C., Offner, J.M., Robert, F., Damon, J., Sadran, P., Wyvekens, A., Lelevrier, C., tronquoy, P., 2005. *Villes et territoires*. Paris, La Documentation française, Les Cahiers français n°328.
- Bousquet, F., Bakam, I., Proton, H., Le Page, C., 1998. *Cormas : Common-Pool Resources and Mutli-Agent Systems*. IEA/AIE'98 : Proceedings of the 11th International Conference on Industrial and Engineering Applications of Artificial Intelligence and Expert Systems: Tasks and Methods in Applied Artificial Intelligence, Lecture Notes in Computer Science, 1416, New York: Springer, 826—837.
- Brooks, R., 1986. *A Robust Layered Control System for a Mobile Robot*. *IEEE Journal of Robotics and Automation*, 2 (1).
- Cagliioni, M., Pelizzoni, M., Rabino, G. A., 2006. *Urban Sprawl: A Case Study for Project Gigalopolis Using SLEUTH Model*. ACRI 2006: 436-445.
- Caneparo, L., Guerra, F., Masala, E., 2006. *UrbanLab – Generative platform for urban and regional design*. In Proceedings: 8th International DDSS Conference. Progress in Design & Decision Support Systems in

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Architecture and Urban Planning. Eindhoven University of Technology, The Netherlands. Jos P. van Leeuwen & Harry J.P. Timmermans Ed.

Carneiro, C., Silva, V., Golay, F., 2009. *Incorporation of Morphological Properties of Buildings' Descriptors Computed from GIS and LIDAR Data on an Urban Multi-agent Vector Based Geo-simulator*. Lectures Notes in Computer Science, Computational Science and Its Applications – ICCSA 2009.

Carneiro, C.; Golay, F.; Silva, V.; Plazanet, C.; Park, J.-J., 2008. *GIS and LIDAR Data Analysis for the Integration of Multidimensional Indicators on Urban Morphogenesis Multi-agent Vector Based Geosimulation*. Geocomputation and Urban Planning: Studies in Computational Intelligence, B. Murgante, G. Borruzo and A. Lapucci (Eds.), vol. 176, 2008, p. 187-208.

Cecchini, A., 1996. *A cellular automaton and some specialized automata for urban modelling*. Environment and Planning B, Vol.23, n°4, pp.721-732.

Chamussy, H., 2004. Site web: <http://www.hypergeo.eu/spip.php?article9>.

Clarke, K.C., Gaydos, L., 1998. *Loose-coupling a cellular automaton model and GIS: long-term urban growth prediction for San Francisco and Washington/Baltimore*. International Journal of Geographic Information Science, 12 (7): 699-714.

Clarke, K.C., Hoppen, S., Gaydos, L., 1997. *A self-modifying cellular automaton model of historical urbanization in the San Francisco Bay area*, Environment and Planning B: Planning & Design 24, pp. 247–261.

Conseil Fédéral, 2001. *Politique des agglomérations de la Confédération*. Rapport du Conseil Fédéral du 19 décembre 2001.

Couclelis, H., 2003. *The Certainty of Uncertainty: GIS and the Limits of Geographic Knowledge*. T. GIS 7(2): 165-175.

Courdier, R. Guerrin, R., Andriamasinoro, F.H., Paillat, J.M., 2002. *Agent-based simulation of complex systems: application to collective management of animal wastes*. Journal of Artificial Societies and Social Simulation.

Courdier, R., Marcenac, P., Giroux, S., 1998. *Un processus de développement en spirale pour la simulation multi-agents*. Revue L'Objet, Ed. Hermès, Vol. 4, pp. 73-86.

Dauphiné, A., 2003. *Les théories de la complexité chez les géographes*. Paris, Anthropos.

Deffuant, G., Amblard, F., Weisbuch, G., Faure, T., 2002. *How can extremism prevail? A study based on the relative agreement interaction model*. Journal of Artificial Societies and Social Simulation, vol.5, 4.

Demazeau, Y., 1995. *From interactions to collective behaviour in agent-based systems*. European Conference on Cognitive Science, p. 117-132, 1995.

Devisch, O.T.J., Timmermans, H.J.P., Arentze, T.A., Borgers, A.W.J., 2006. *Modelling Residential Search and Location Choice - Framework and Numerical Experiments*. In Proceedings: 8th International DDSS Conference. Progress in Design & Decision Support Systems in Architecture and Urban Planning. Eindhoven.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Drogoul, A., Nguyen-Duc, M., Duong, V., Briot, J.-P., 2003. *Multi-Agent coordination techniques applied to Air Traffic Control*. RIVF 2003: 59-64.
- Duchêne, C., 2004. *Généralisation par agents communicants: le modèle CARTACOM. Application aux données topographiques en zone rurale*. Thèse de doctorat en informatique. Université Paris VI-Pierre et Marie Curie.
- Duchêne, C., Regnauld, N., 2002. *Le modèle AGENT*. In : Ruas A., Généralisation et représentation multiple, Paris, Hermes Lavoisier, Chapitre 21, pp 369-386.
- Duchêne, C., Barrault, M., Regnaud, N., Haire, K., Baeijs, C., Hardy, P., Mackaness, W., Ruas, A., Weibel, R., 2001. *Integrating multi-agent, object oriented algorithm techniques for improved automated map generalization*, 20<sup>th</sup> International Cartographic conference (ICC'01), 6-10 August, Beijing (China).
- El hadouaj S., Espié S., Drogoul A., 2001. *Un modèle de simulation de trafic basé sur une architecture multi-agents*. Actes de l'école d'intelligence artificielle.
- Elissalde, B., Rhein, C., *La fragmentation sociale et urbaine en débats*. In : L'information géographique n°2, 2004.
- Engelen, G., White, R., Uljee, I., 1997. *Integrating Constrained Cellular Automata Models, GIS and Decision Support Tools for Urban Planning and Policy Making*. In : Decision Support Systems in Urban planning, edited by H. Timmermans, E & FN Spon, London, U.K, pp. 125-155.
- Ferber, J., Gutknecht, O., 2000. *Vers une méthodologie organisationnelle de conception de systèmes multi-agents*. JFIADSM'99. La Réunion, Hermès, pp. 93-104.
- Ferber, J., 1997. *Les systèmes multi-agents : Vers une intelligence collective*. InterEditions.
- Fischer, G., Lemke, A. S., McCall, R, Morch, A. I., 1996. *Making argumentation serve design*. In Moran, T. P., & Carroll, J. M. (Eds.), Design rationale: Concepts, techniques, and use, 267-293. Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
- Fishwick, P.A., 1997. Web-based Simulation. Winter Simulation Conference 1997: 100-102.
- Fishwick, P.A., 1995. Simulation Model Design. Winter Simulation Conference 1995: 209-211.
- Frank, A.U., Bittner, S., Raubal, M., 2000. *Spatial and Cognitive Simulation with Multi-agent Systems*. Lecture Notes in Computer Science.
- Frankhauser, P., 1991. *Aspects fractals des structures urbaines*. L'Espace Géographique, n° 1, pp. 45-70.
- Franklin, S., Graesser, A., 1996. *Is it an Agent, or just a Program?: A Taxonomy for Autonomous Agents*. Proceedings of the Third International Workshop on Agent Theories, Architectures, and Languages, Springer-Verlag.
- Fyano, E., Treuil, J.-P., Perrier, E., Demazeau, Y., 1998. *Multi-agent Architecture Integrating Heterogeneous Models of Dynamical Processes : the Representation of Time*. In : Schiman, Jaime S., Conte, Rosaria, & Gilbert, Nigel (eds), Proceedings of the 1st Workshop on Modelling Agent Based Systems, MABS'98, vol. 1534. Lecture Notes in Artificial Intelligence LNAI, Springer-Verlag, Berlin.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Garnier, A., 2007. *L'information non structurée dans l'entreprise – usages et outils*. Hermes – Lavoisier.
- Gazel, H., 2001. *Métropolisation et dynamiques de peuplement. L'émergence de la métropole euro-méditerranéenne*. Synthèse du rapport de recherche pour la DATAR de François Moriconi-Ebrard. Cahiers de la métropolisation, Marseille.
- Développement durable. Quels enjeux géographiques ?*, dossier n°8053, Gérard Granier, Yvette Veyret, Paris, La Documentation française, 3<sup>e</sup> trimestre 2006, ISSN 04195361.
- Griffeth, N. D., Velthuisen, H., 1994. *The negotiating agents approach to runtime feature interaction resolution*. FIW 1994: 217-235.
- Hammam, Y., Moore, A., Whigham, P.A., 2007. *The dynamic geometry vector agents*. Computers, Environment and Urban Systems 31(5), pp. 502-519.
- Hammam, Y., Moore, A., Whigham, P., Freeman, C., 2003. *A vector-agent paradigm for dynamic urban modelling*. In: Proceedings of 15th Annual Colloquium of the Spatial Information, Research Centre, Dunedin, New Zealand.
- Hayes-Roth, B., 1995. *Agents on Stage: Advancing the State of the Art of AI*. Knowledge Systems Laboratory.
- Hillier, B., 1999. *The common language of space: a way of looking at the social, economic and environmental functioning*. Journal of Environmental Science, Vol. 11 No.3.
- Jennings, N.R., 2000. *On agent-based software engineering*, Artificial Intelligence 117, 277–296.
- Jiang, B., Gimblett H. R., 2002. *An agent-based approach to Environmental and Urban systems within Geographic Information Systems*. In : H. R. Gimblett (Ed.) Integrating Geographic Information Systems and Agent-Based Technologies for Modelling and Simulating Social and Ecological Phenomenon, New York, Oxford University Press, pp. 171-190.
- Jouve, B., Lefevre, C., 2004. *Horizons métropolitains*. Lausanne, Presses polytechniques romandes.
- Kaufmann, V., Chenal, J., 2007. *La Suisse métropolisée à l'épreuve des Alpes*. In : Habiter la métropole Suisse. L'urbanisation est-elle planifiable? Bern: Académie suisse des sciences humaines et sociales.
- Kolbe, T. H., Gröger, G., Czerwinski, A., Nagel, C., 2008. *OpenGIS® City Geography Markup Language (CityGML) Encoding Standard*, OGC Int. Standard, Doc. No. 08-007r1 2008.
- Labrou, Y.K., Finin, T., 2000. *State of the Art and Challenges for Agent Communication Languages*. Article, Informatik/Informatique.
- Lamy, S., Ruas, A., Demazeau, Y., Baeijs, C., Jackson, M., Mackaness, W., Weibel, R., 1999. *AGENT Project: Automated Generalisation New Technology*. 5<sup>th</sup> EC-GIS Workshop, Stresa(I), 28-30 June 1999, in Proceeding, pp.407-415, Edited by K. Fullerton, laboratoire COGIT, IGN-SR 990035/S-COM, 1999.
- Langlois, P., Dubos-Paillard E., Guermond Y., 2003. *Analyse de l'évolution urbaine par automate cellulaire*. Le modèle SpaCelle. In: Modélisation spatiale, pp. 357-378.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Lawson, B.G., Park, S., 2000. *Asynchronous Time Evolution in an Artificial Society Model*. J. Artificial Societies and Social Simulation 3(1).
- Le Moigne, J.-L., 1977. *Théorie du système général*, PUF, Paris.
- Li, X., Yeh, A. G. O., 2000. *A constrained CA model for the simulation and planning of sustainable urban forms by using GIS*. Environment and Planning B: Planning and Design 28(5).
- Lohani, B., Singh, R., 2007. *Effect of data density, scan angle, and flying height on the accuracy of building extraction using LiDAR data*. Geo Carto International.
- Magnin, L., 1996. *Modélisation et simulation de l'environnement dans les systèmes multi-agents. Application aux robots footballeurs*. Thèse de l'université Paris VI, 1996.
- Martinoli, A., Cianci, C.M., Lochmatter, T., Pugh, J., 2007. *Toward multi-agent modeling of robotic sensor networks: a case study in acoustic event monitoring*. In: International Conference on Robot Communication and Coordination (ROBOCOMM), pages 1-8, Athens, Greece, 2007.
- McCarthy, J., Hayes, P. J., 1969. *Some philosophical problems from the standpoint of artificial intelligence*. In Meltzer, B., and Michie, D., eds., Machine Intelligence 4. Edinburgh: Edinburgh University Press.
- Michel, F., 2004. *Formalisme, outils et éléments méthodologiques pour la modélisation et la simulation multi-agents*. Thèse de doctorat, Univ. Des Sciences et Techniques du Languedoc.
- Minsky, M., 1988. *The Society of Mind*. Simon and Schuster, New York.
- Monti, D.J., 1999. *The American City: A Social and Cultural History*. Oxford, England and Malden, Massachusetts: Blackwell Publishers.
- Morin, E., 1980. *La méthode : 2. La vie de la vie*, Paris : Seuil.
- ONU, 2008. Site web : [http://www.un.org/News/fr-press/docs/2008/Note\\_No\\_6144.doc.htm](http://www.un.org/News/fr-press/docs/2008/Note_No_6144.doc.htm)
- O'Sullivan, D., Torrens, P.M., 2000. *Cellular models of urban systems*. Theoretical and Practical Issues on Cellular Automata, S. Bandini, T. Worsch ed., Londres : Springer-Verlag.
- Park, J.-J., 2009. *Ville contemporaine et lois de symétrie*. Thèse EPFL, no 4593.
- Paulet, J. -P., 2009. *Géographie urbaine*, éd. Armand Colin, coll. « 128 », Paris.
- Plazanet, C., 2008. *Morphogenèse de la Métropole. Projet de recherche interdisciplinaire EPFL*. Rapport de recherche Final.
- Plazanet, C., 2006. *Morphogenèse de la Métropole. Projet de recherche interdisciplinaire EPFL*. Rapport de recherche.
- Portugali, J., 2000. *Self-Organisation and the City*. Berlin : Springer-Verlag.
- Pumain, D., 2004. Extrait du site Web: Hypergeo (<http://www.hypergeo.eu/spip.php?article74>).



## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Pumain, D., Sanders, L., Saint-Julien, T., 1989. *Villes et autoorganisation*. Paris : Ed. Economica.
- Rao, A.S., Georgeff, M.P., 1995. *BDI agents: from theory to practice*. In Victor Lesser, editor, Proceedings of the First International Conference on Multi-Agent Systems, San Francisco, CA, MIT Press. pp. 312-319.
- Reymond, H., Cauvin, C., Kleinschmager, R., 1998. *L'espace géographique des villes. Pour une synergie multistrates*. Paris, Economica.
- Rodrigues, A., Raper, J., 1999. *Defining spatial agents*. In: Spatial Multimedia and Virtual Reality Research Monographs Series, Eds J Raper, A Câmara (Taylor and Francis, London) pp. 111 – 129.
- Rodrigues, A., Grueau, C., Raper, J., Neves, N., 1998. Environmental planning using spatial agents. In: S. Carver (ed.) *Innovation in GIS 5*, Taylor & Francis, London.
- Ruas, A., 2000. *The role of meso objects for generalisation*. 9<sup>th</sup> International Symposium on Spatial Data Handling (SDH'00), 10-12 August, Beijing (China).
- Ruas, A., 1995. *Formalismes pour l'automatisation de la generalisation: métrique, topologie, partitionnement, hiérarchique et triangulation locale*. In: 17<sup>th</sup> International Cartographic Conference (ICC'95), 3-9 September, Barcelona (Spain).
- Russell, S., Norvig, P., 1995. *Artificial Intelligence: A modern Approach*. Prentice-Hall, Saddle River, NJ.
- Rykiel, E.J., 1996. *Testing ecological models : the meaning of validation*. *Ecological Modeling*, 90 : 229-244.
- Salingaros, N. A., 2005. *Principles of Urban Structure*. Techne Press, Amsterdam.
- Sanders, L., 2004. Site web: <http://www.hypergeo.eu/spip.php?article63>.
- Schetter, T., Campbell, M., Surka, D., 2003. *Multiple agent-based autonomy for satellite constellations*. *Artificial Intelligence* 145, 147–180.
- Schlesinger, S., et al. (1979). *Terminology for model credibility*. *Simulation* 32, 3 (Mar.), 103-104.
- Scott, A. J., 2001. *Global City Regions: Trends, Theory, Policy*. Oxford University Press.
- Semboloni, F., 1997. *An urban and regional model based on cellular automata*. *Environment and Planning B-Planning & Design* 24: 589-612.
- Shannon, R.E., 1998. *Introduction to the Art and Science of Simulation*. *Winter Simulation Conference* 1998:7-14.
- Silva, V., Plazanet, C., Carneiro, C. Golay, F., 2008. *3D LIDAR data application for urban morphogenesis multi-agent vector based geosimulation*. *GEOG-AN-MOD 08: Third International Workshop on Geographical Analysis, Urban Modeling, Spatial Statistics*. Perugia, Italy. 30/6- 3/7 2008.
- Simonin, O. 2001. *Le modèle satisfaction-altruisme: coopération et résolution de conflits entre agents situés réactifs, application à la robotique*. PhD thesis, USTL.
- Soguel N., Martin M.-J., Tangerini A., 2008. *The Impact of Housing Market Segmentation between Tourists and Residents on the Hedonic Price for Landscape Quality*. *Swiss Journal of Economics and Statistics*, 144(4), 655-678.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Stevens, P. S., 1978. *Les formes dans la nature*. Ed. du Seuil, coll. Science Ouverte.
- Sudeikat, J., Braubach, L., Pokahr, A., Lamersdorf, W., 2004. *Evaluation of Agent-Oriented Software Methodologies - Examination of the Gap Between Modeling and Platform*. AOSE 2004: 126-141
- Travers, M.D., 1996. *Programming with Agents : New metaphors for thinking about computation*. PhD thesis, Massachusetts Institute of Technology, MIT.
- Treuil, J.-P., Mullon, C., 1997. *Expérimentation sur mondes artificiels : pour une réflexion méthodologique*, Blasco F. (coord.) Tendances nouvelles en modélisation pour l'environnement. Paris : Elsevier, 1997, p. 425-431.
- Turing, A.M., 1950. *Computing machinery and intelligence*. Mind, 59, 433-460.
- Vanbergue, D., Drogoul, A., 2002. *Approche multi-agent pour la simulation urbaine*. Actes des 6èmes Journées CASSINI, pages 95-112.
- Versteegh, P., 2005. *Méandres. Penser le paysage urbain*. Presses polytechniques et universitaires romandes, Architecture Essais, Lausanne.
- Von Bertalanffy, L., 1968. *General System Theory: Foundations, Developments, Applications*. New York: Braziller.
- Waddell, P., Wang, L., Xuan, L., 2008. *UrbanSim: An Evolving Planning Support System for Evolving Communities*. Planning Support Systems for Cities and Regions, edited by Richard Brail. Cambridge, MA: Lincoln Institute for Land Policy, pp. 103-138.
- Waddell, P., Ulfarsson, G.F., 2004. *Introduction to Urban Simulation: Design and Development of Operational Models*. In Handbook in Transport, Volume 5: Transport Geography and Spatial Systems, Stopher, Button, Kingsley, Hensher eds. Pergamon Press, pages 203-236.
- Waddell, P., Borning, A., Noth, M., Freier, N., Becke, M., Ulfarsson, G., 2003. *Microsimulation of Urban Development and Location Choices: Design and Implementation of UrbanSim*. In Networks and Spatial Economics, Vol. 3 No. 1, pages 43--67.
- Waddell, P., 2002. *UrbanSim: Modeling Urban Development for Land Use, Transportation and Environmental Planning*. In Journal of the American Planning Association, Vol. 68 No. 3, pages 297-314.
- Weiss, G., 1999. *Multi-agent Systems: A Modern Approach to Distributed Artificial Intelligence*. MIT Press.
- White, R. and Engelen, G., 1993. *Cellular Automata and Fractal Urban Form: A Cellular Modeling Approach to the Evolution of Urban Land Use Patterns*. Environment and Planning A, 25, 1175-1199.
- White, R., Engelen, G., 1997. *Multi-scale spatial modelling of self-organizing urban systems*. In: Self-organization of Complex Structures: From Individual to Collective Dynamics Ed. F Schweitzer (Gordon and Breach, London) pp. 519 – 535.
- Wooldridge, M., 2009. *An Introduction to MultiAgent Systems*. John Wiley & Sons.
- Wooldridge, M., Ciancarini, P., 2001. *Agent-oriented software engineering : The state of the art*. Agent-oriented software engineering. International workshop N°1, Limerick, IRLANDE , vol. 1957, pp. 1-28.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Wooldridge, M., Jennings, N. R., Sycara, K., 1998. *A Roadmap of Agent Research and Development*. Int. Journal of Autonomous Agents and Multi-Agent Systems, 1 (1). pp. 7-38.

Wooldridge, M., Jennings, N., 1998. *Applications of Intelligent Agents*. Agent Technology: Foundations, Applications, and Markets. Springer-Verlag: Heidelberg, Germany. pp. 3-28.

Wooldridge, M., Jennings, N. R., 1995. *Intelligent agents: theory and practice*. In Knowledge Engineering Review, vol. 10, no. 2.

Wu, F., Webster, C.J., 1998. *Simulation of land development through the integration of cellular automata and multi-criteria evaluation*. Environment and Planning B, 25, pp. 103-126.

Zeigler, B.P., 1976. *Theory of Modelling and Simulation*. John Wiley & Sons, New York.

Zimmermann, G., 2006. *Multi-Agent Model to Multi-Process Transformation – A housing market case study*. In Proceedings: 8th International DDSS Conference. Innovations in Design & Decision Support Systems in Architecture and Urban Planning.. Eindhoven University of Technology, The Netherlands. Jos P. van Leeuwen & Harry J.P. Timmermans Ed.

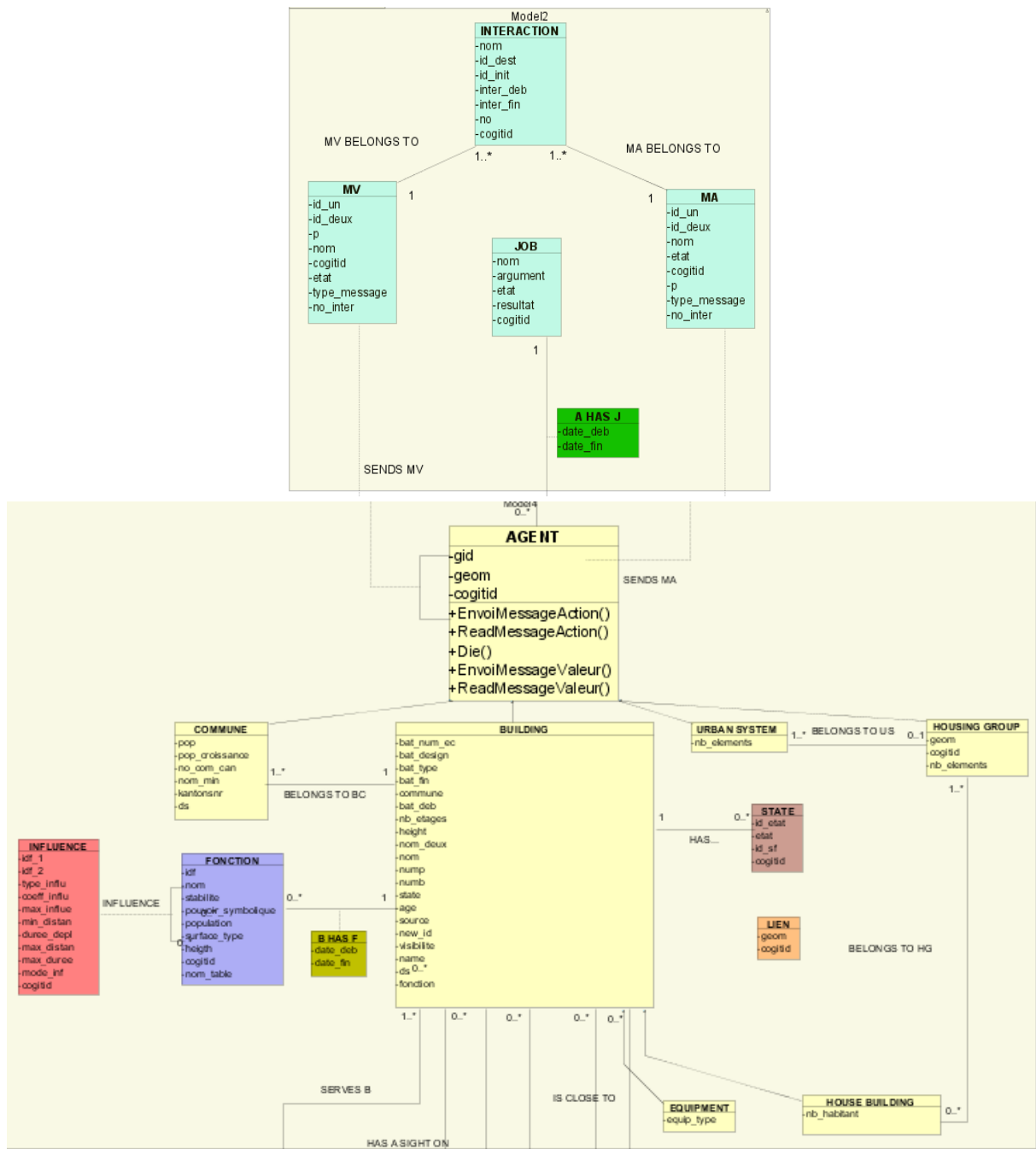
Zwolak, K., *Extraction of morphological indicators from georeferentiated data in urban area*. Projet de Master EPFL, Lab. LaSIG. Juillet 2008.



## ANNEXES

### ANNEXE A :

#### A.1 Diagramme de classes détaillé du modèle de simulation



## ANNEXES

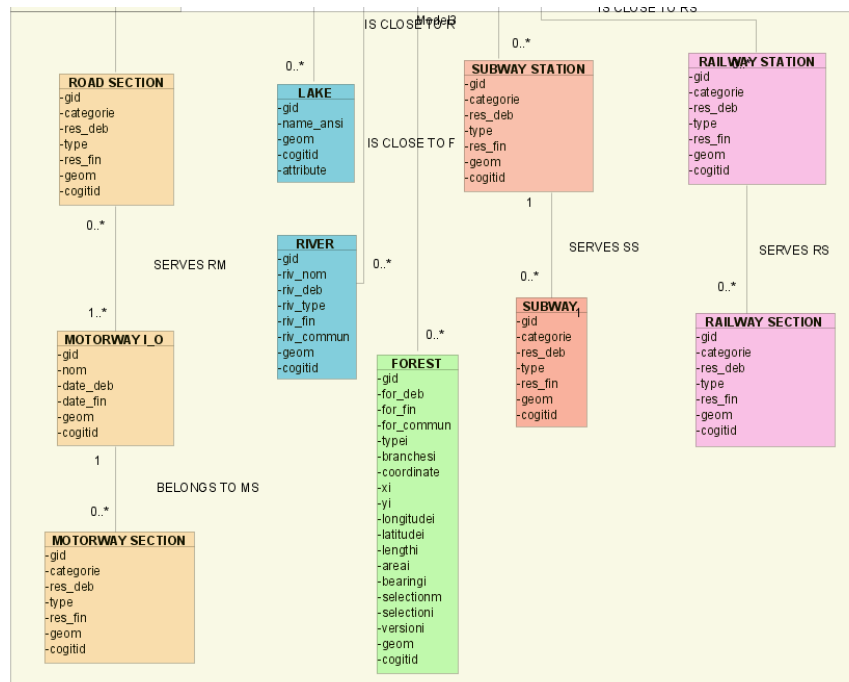


Figure 91: Diagramme de classes détaillé

## A.2 Description détaillée des classes du modèle de simulation

### 1. La classe Agent

La classe *Agent* possède la capacité cognitive du système multi-agents. Elle représente un agent qui est capable de percevoir son environnement et de prendre des décisions de manière à satisfaire ses objectifs. La classe *Agent* se spécialise en 4 classes différentes : *Batiment*, *Commune*, *Système urbain* (à un niveau conceptuel) et *Groupe d'Habitat* (Housing Group). La classe *Agent* a la capacité de gérer une communication avec les autres agents au moyen de différentes classes.

### 2. La classe Commune

Cette classe représente un agent macro. C'est un agent composé d'agents micro et macro. La ville peut être définie [Park, 2009] comme un ensemble de systèmes urbains en interaction et d'éléments individuels ne faisant pas partie d'un système quelconque.

La classe *Commune* possède notamment les attributs suivants :

- **population** : valeur du nombre d'habitants
- **nom** : nom de la commune
- **no\_commune** : numéro de la commune (par rapport au canton où elle se trouve)
- **densite\_indice** : indice de densité
- **geom** : géométrie 2D

## ANNEXES

### 3. La classe *Batiment*

C'est une classe de notre simulateur qui est associée à une table dans le SGBD. Elle contient tous les bâtiments de tous les types (logement, école, hôpitaux, etc.). Elle possède les attributs suivants :

- **nom**
- **fonction** : correspond à la fonction qu'abrite le bâtiment
- **hauteur**
- **nombre d'étages**
- **visibilité** : correspond à la visibilité du bâtiment sur le lac. C'est un attribut important comme on le verra par la suite étant donné que l'on se trouve dans la zone lémanique.
- **âge**
- **date de création**
- **date de destruction**
- **degré de satisfaction** : correspond au *Degré de Satisfaction* du bâtiment calculé selon une formule définie plus haut dans le texte. C'est un attribut qui doit être périodiquement mis à jour.
- **commune** : correspond à la commune à laquelle appartient le bâtiment
- **désignation cadastrale**
- **état** : correspond à l'état dans lequel se trouve le bâtiment, créé ou détruit
- **geom** : géométrie 2D

### 4. La classe *Système Urbain*

L'agent *Système Urbain* n'a pas été implémenté dans le système car sa formalisation n'a pas été achevée [Park, 2009]. Mais dans un projet futur il serait très intéressant de pouvoir l'intégrer dans le système et de le détecter comme on l'a fait pour les groupes d'habitat.

### 5. La classe *Groupe d'Habitats*

Cette classe représente des groupes de bâtiments du type logement (cf. *Groupe d'Habitats* défini plus haut). C'est un agent méso. La classe possède les attributs suivants :

- **nb\_elts** : représente le nombre d'éléments de la classe
- **fonction** : fonction des éléments du groupe
- **pop** : nombre d'habitants appartenant au groupe
- **geom** : géométrie 2D

### 6. Les fonctions (*classe fonction*)

Les architectes ont établi une classification hiérarchique des fonctions (ou programmes) des bâtiments, des réseaux, de l'environnement et des bâtiments mixtes. Selon les architectes ces fonctions nous permettent de définir les influences entre les objets de l'espace urbain. Selon [Park, 2009], les bâtiments urbains (et notamment les logements) ont tendance à se regrouper par fonctions.

## **ANNEXES**

Un bâtiment peut contenir une ou plusieurs fonctions. Il peut aussi faire partie d'un programme architectural : université, stade olympique, centre commercial. Un programme architectural peut être hébergé dans un bâtiment, être le bâtiment lui-même ou un ensemble de bâtiments. Le programme architectural n'est pas modélisé dans le cadre de ce projet mais il devrait l'être dans le futur.

On a la classification hiérarchique des fonctions suivante (la classification détaillée des fonctions est donnée à l'annexe D) :

- 1. Bâtiments**
  - 11. Logements**
  - 12. Écoles**
  - 13. Commerces**
  - 14. Établissements de santé**
  - 15. Bâtiments publics**
  - 16. Travail (fabriques)**
  - 17. Loisirs**
    - 171. Sports**
    - 172. Culture**
    - 173. Détente**
  - 18. Services**
  - 19. Divers : dépendances et bâtiments annexes**
- 2. Agents Réseaux**
  - 21. Transports**
  - 22. Réseaux de sous-sol**
- 3. Environnement**
  - 31. Topographie**
  - 32. Hydrographie**
  - 33. Verdure**

Dans le milieu urbain on trouve aussi une certaine mixité. Par exemple un bâtiment peut abriter plusieurs fonctions différentes. On trouve ainsi souvent dans les centres-villes des immeubles de type habitation forte densité (fonction 113) avec au rez-de-chaussée un ou plusieurs petits commerces (fonction 131). On a donc aussi les fonctions suivantes :

- 4. Bâtiment mixte**
  - 41. Logement / Commerce**
  - 42. Logement / Travail**
  - 43. Logement / Service**
  - 44. Travail / Commerce**

La classe fonction possède les attributs suivants :

- *nom*



## ANNEXES

- **idf** : correspond au numéro de la fonction.
- **hauteur** : hauteur du bâtiment abritant la fonction, correspond à une hauteur moyenne.
- **surface** : correspond à la surface moyenne du bâtiment abritant la fonction.
- **population** : correspond au nombre de personnes résidant/travaillant dans le bâtiment abritant la fonction donnée.
- **pouvoir\_symbolique** : correspond au pouvoir symbolique de la fonction. Cet attribut a une valeur seulement pour certains types d'objets, comme par exemple des monuments, qui ont un pouvoir symbolique culturel. Il peut prendre des valeurs entre 0 et 10. Un lieu de culte a ainsi un pouvoir symbolique de 10 tandis qu'une habitation forte densité a un pouvoir symbolique de 0.
- **stabilité** : correspond à l'espérance de vie de la fonction, par exemple une école primaire (fonction 121) aura une stabilité de 50 ans. Les objets abritant une fonction tels que des bâtiments ont eux-mêmes une stabilité qui peut différer de la stabilité de la fonction abritée.

Un extrait de la table associée à la classe *Fonction* est donné à la fig. 92. Les valeurs présentes dans la table correspondent aux valeurs des paramètres d'entrée dans le moteur de simulation.

IDF	Nom	Stabilite	Pouvoir_Symbolique	Population	Surface	Hauteur
111	Habitation faible densité	50	0	4	100	6
112	Habitation moyenne densité	50	0	20	200	9
113	Habitation forte densité	50	0	30	400	15

Figure 92: Extrait de la table *fonction*

Le numéro IDF correspond au type de la fonction (par exemple le numéro 111 correspond à la fonction logement telle qu'introduite auparavant).

### 7. L'influence entre fonctions (classe *influence*)

Les fonctions décrites dans le chapitre précédent ont une influence les unes sur les autres. Une fonction donnée peut être influencée, c'est-à-dire qu'il y a une attraction ou une répulsion, par 0 à n autres fonctions et influencer à son tour 0 à m fonctions. Ainsi un commerce (fonction 131) aura une influence positive sur des habitations forte densité (fonction 113) par exemple.

La classe **influence** possède les attributs suivants :

- **idf\_un** : numéro de la fonction qui influence (fonction *influençante*).
- **idf\_deux** : numéro de la fonction qui est influencée (fonction *influencée*). Ainsi la fonction *idf\_un* influence la fonction *idf\_deux*.
- **coeff\_influence** : coefficient dont la valeur varie de 0 à 10, 10 étant la valeur d'influence maximum.
- **max\_influence** : rayon d'influence (mesuré en mètres) maximum au-delà duquel la fonction *idf\_un* n'a plus d'influence sur la fonction *idf\_deux*.
- **type\_influence** : indique si l'influence est positive (S : service) ou négative (N : nuisance).

## ANNEXES

La fig. 93 montre un extrait de la table influence (la table complète est donnée à l'annexe C.2). Un bâtiment industriel (fonction 163) a une influence négative sur les habitations faible densité (première ligne) et jusqu'à une distance de 500 mètres et avec un coefficient d'influence de 9. En revanche un bâtiment administratif (fonction 151) a une influence positive sur des logements moyenne densité (fonction 112) et jusqu'à une distance de 5000 mètres. Les *idf\_un* et *idf\_deux* peuvent être identiques et l'on se trouve alors dans un cas d'influence de voisinage et les fonctions respectives ont ainsi tendance à se regrouper.

<i>idf_un</i>	<i>idf_deux</i>	Type_influence	Coef_influence	Max_influence
163	111	N	9	500
163	112	N	9	2000
163	113	N	9	2000
151	112	S	2	5000

Figure 93: Extrait de la table *influence*

### 8. Les réseaux

On trouve différents types de réseaux dans notre système (le code en *Java* des classes est donné en annexe):

- **Les routes (classe *Route*) :**

La table «route» associée à la classe *Road* contient les tronçons de route.

- **Les autoroutes (classe *Autoroute*) :**

La table «autoroute» associée à la classe *Autoroute* contient les tronçons d'autoroute.

- **Les voies ferrées (classe *Reseau\_cff*) :**

La table «reseau\_cff» associée à la classe *Reseau\_cff* contient les tronçons de voie ferrée.

- **Les voies ferrées (classe *Reseau\_tsol*) :**

La table «reseau\_tsol» associée à la classe *Reseau\_tsol* contient les tronçons de voie du métro.

- **Les réseaux hydrographiques (classe *Riviere*) :**

La table «riviere» associée à la classe *Riviere* contient les tronçons du réseau hydrographique.

### 9. Les autres objets qui ne rentrent pas dans les catégories ci-dessus :

- **Les forêts (classe *Foret*)**

- **Les lacs (classe *Lac*)**

- **Les entrées et les sorties d'autoroute (classe *Autoroute\_es*)**

- **Les gares (classe *Gare*)**

- **Les arrêts du métro (classe *Tsol*)**

## ANNEXES

### ANNEXE B :

#### Code Java des classes du modèle d'interaction

Le code Java des classes associées au modèle d'interaction est donné ci-dessous :

##### Classe *Interaction* :

```
package ch.epfl.uta.interaction.classes;

/**/**
 * Classe qui permet de gérer les interactions entre les agents
 *
 * Date : 2008
 * @authors Silva
 */**
*/

public class Interaction extends fr.ign.cogit.geoxygene.feature.FT_Feature {

    protected String nom;
    public String getNom() {return this.nom; }
    public void setNom (String Nom) {nom = Nom; }

    protected int id_init;
    public int getId_init() {return this.id_init; }
    public void setId_init (int Id_init) {id_init = Id_init; }

    protected int id_dest;
    public int getId_dest() {return this.id_dest; }
    public void setId_dest (int Id_dest) {id_dest = Id_dest; }

    protected int inter_start;
    public int getInter_start() {return this.inter_start; }
    public void setInter_start (int Inter_start) {inter_start = Inter_start; }

    protected int inter_end;
    public int getInter_end() {return this.inter_end; }
    public void setInter_end (int Inter_end) {inter_end = Inter_end; }

    protected int no;
    public int getNo() {return this.no; }
    public void setNo (int No) {no = No; }

}
```

## ANNEXES

### Classe Mv :

```
package ch.epfl.uta.interaction.classes;

/* Classe qui permet de créer un message de type Mv[]
*/

public class Mv extends fr.ign.cogit.geoxygene.feature.FT_Feature {

    protected int id_one;
    public int getId_one() {return this.id_one; }
    public void setId_one (int Id_one) {id_one = Id_one; }

    protected int id_two;
    public int getId_two() {return this.id_two; }
    public void setId_two (int Id_two) {id_two = Id_two; }

    protected String name_sender;
    public String getName_sender() {return this.name_sender; }
    public void setName_sender (String Name_sender) {name_sender = Name_sender; }

    protected String name_receiver;
    public String getName_receiver() {return this.name_receiver; }
    public void setName_receiver (String Name_receiver) {name_receiver = Name_receiver; }

    protected int state;
    public int getState() {return this.state; }
    public void setState (int State) {state = State; }

    protected double p;
    public double getP() {return this.p; }
    public void setP (double P) {p = P; }

    protected String type_message;
    public String getType_message() {return this.type_message; }
    public void setType_message (String Type_message) {type_message = Type_message; }

    protected String name;
    public String getName() {return this.name; }
    public void setName (String Name) {name = Name; }

    protected int no_inter;
    public int getNo_inter() {return this.no_inter; }
    public void setNo_inter (int No_inter) {no_inter = No_inter; }

    protected int idf_sender;
    public int getIdf_sender() {return this.idf_sender; }
    public void setIdf_sender (int Idf_sender) {idf_sender = Idf_sender; }

}
```

## ANNEXES

### Classe Ma :

```
public class Ma extends fr.ign.cogit.geoxygene.feature.FT_Feature {

    protected int id_un;
    public int getId_un() {return this.id_un; }
    public void setId_un (int Id_un) {id_un = Id_un; }

    protected int id_deux;
    public int getId_deux() {return this.id_deux; }
    public void setId_deux (int Id_deux) {id_deux = Id_deux; }

    protected int etat;
    public int getEtat() {return this.etat; }
    public void setEtat (int Etat) {etat = Etat; }

    protected double p;
    public double getP() {return this.p; }
    public void setP (double P) {p = P; }

    protected String type_message;
    public String getType_message() {return this.type_message; }
    public void setType_message (String Type_message) {type_message = Type_message; }

    protected String nom;
    public String getNom() {return this.nom; }
    public void setNom (String Nom) {nom = Nom; }

    protected int no_inter;
    public int getNo_inter() {return this.no_inter; }
    public void setNo_inter (int No_inter) {no_inter = No_inter; }

    protected String nom_sender;
    public String getNom_sender() {return this.nom_sender; }
    public void setNom_sender (String Nom_sender) {nom_sender = Nom_sender; }

    protected String nom_receiver;
    public String getNom_receiver() {return this.nom_receiver; }
    public void setNom_receiver (String Nom_receiver) {nom_receiver = Nom_receiver; }

    protected String etat_final;
    public String getEtat_final() {return this.etat_final; }
    public void setEtat_final (String Etat_final) {etat_final = Etat_final; }

    protected int idf_sender;
    public int getIdf_sender() {return this.idf_sender; }
    public void setIdf_sender (int Idf_sender) {idf_sender = Idf_sender; }

    protected int parametre;
    public int getParametre() {return this.parametre; }
    public void setParametre (int Parametre) {parametre = Parametre; }
```

## ANNEXES

### ANNEXE C :

#### C.1 Table fonction

idf	nom	stabilite	pouvoir_symbolique	population	surface_type	height
111	Habitation faible densite	50	0	4	100	6
112	Habitation moyenne densite	50	0	20	200	9
113	Habitation forte densite	50	0	30	400	15
121	Ecole primaire	50	0	2000	120	6
131	Commerces de proximite (boutique)	30	0	1000	100	6
132	Supermarche	20	0	3000	200	9
133	Centre commercial	15	0	10000	800	12
163	Bâtiment industriel	15	0	10000	1000	12
143	CHU	50	3	0	5000	18
153	Cimetiere	10000	5	20000	3000	3
152	Lieux de culte	10000	10	20000	300	21
142	Hepital, clinique	50	0	10000	300	9
141	Dispensaire de quartier, centre medical	20	0	2000	150	6
123	Universite, Haute ecole	100	5	0	5000	12
151	batiment administratif	100	0	20000	400	12
2111	Autoroute avec mur anti-bruit	30	0	0	0	0
212	Route	100	0	0	0	0
322	Riviere	10000	0	0	0	0
122	École secondaire : college, gymnase	100	0	10000	0	0
154	Musee	500	8	30000	0	0
161	Batiment de bureaux	20	0	3000	0	0
162	Atelier d artisanat, pepiniere	50	0	1000	0	0
1711	Batiment sportif	50	0	10000	0	0
1712	Terrain de sport	20	0	10000	0	0
1713	Piscine	50	0	0	0	0
1714	Bowling, billard	10	0	0	0	0
1721	Theatre	30	3	10000	0	0
1722	Cinema	30	0	10000	0	0
181	Restaurant, cafeteria	20	0	1000	0	0
182	Hetels	20	0	20000	0	0
331	Foret	10000	7	0	0	0
215	Gare	1000	0	20000	0	0
124	Jardin d enfants, creches	50	0	2000	0	0
157	Bibliotheque	100	3	20000	0	0
159	Batiment de service public	50	0	0	0	0
155	Bureau de poste	50	0	20000	0	0
158	Salle polyvalente	50	0	0	0	0
164	Ferme	100	0	10	0	0

## ANNEXES

156	Banque	20	0	20000	0	0
1723	Centre culturel	30	0	10000	0	0
1731	Jardin familial	30	0	10000	0	0
1732	Parc urbain de quartier	30	0	0	0	0
1733	Grand parc urbain	30	0	0	0	0
1734	Discotheque	30	0	0	0	0
1735	Refuge	30	0	10000	0	0
183	Station service, garage	10	0	10000	0	0
191	Dependance	10	0	0	0	0
192	Toilettes publiques	10	0	10000	0	0
193	Batiments d entretien	30	0	0	0	0
2112	Autoroute sans mur anti-bruit	10	0	0	0	0
213	Sortie d autoroute	100	0	0	0	0
214	Parking	30	0	20000	0	0
216	Aeroport	100	0	0	0	0
217	Arret de bus ou metro	10	0	0	0	0
2181	Ligne CFF ou metro sans mur anti-bruit	30	0	0	0	0
2182	Ligne CFF ou metro avec mur anti-bruit	10	0	0	0	0
221	Canalisation d eau	20	0	0	0	0
222	Conduite de gaz	20	0	0	0	0
311	Sommet	10000	8	0	0	0
321	Lac	10000	10	0	0	0

## ANNEXES

### C.2 Table influence

IDF_1	IDF_2	TYPE_INFLU	CEOFF_INFL	MAX_INFLUE	MIN_DISTAN	DUREE_DEPL	MAX_DISTAN	MAX_DUREE	MODE_INF
163	111	N	9	500	0	0	0	0	0
163	112	N	9	2000	0	0	0	0	0
163	113	N	9	2000	0	0	0	0	0
151	112	S	2	5000	0	0	0	0	0
151	113	S	2	5000	0	0	0	0	0
152	111	S	4	3000	0	0	0	0	0
152	112	S	4	3000	0	0	0	0	0
152	113	S	4	3000	0	0	0	0	0
163	163	S	5	500	0	0	0	0	0
111	111	S	8	200	0	0	0	0	0
112	112	S	5	200	0	0	0	0	0
113	113	S	5	200	0	0	0	0	0
152	153	S	10	500	0	0	0	0	0
211	132	S	9	3000	0	0	0	0	0
211	163	S	7	2000	0	0	0	0	0
322	152	S	8	1000	0	0	0	0	0
322	111	S	9	1000	0	0	0	0	0
322	112	S	7	1000	0	0	0	0	0
113	121	S	9	500	0	0	0	0	0
163	132	S	9	800	0	0	0	0	0
113	161	S	5	1000	0	0	0	0	0
211	161	S	7	2000	0	0	0	0	0
331	111	S	9	1000	0	0	0	0	0
121	111	S	8	1000	0	0	0	0	0
132	111	S	5	7000	0	0	0	0	0
141	111	S	7	5000	0	0	0	0	0
212	111	S	1	400	0	0	0	0	0
121	113	S	8	1000	0	0	0	0	0
131	113	S	5	800	0	0	0	0	0
141	113	S	7	2000	0	0	0	0	0
212	113	S	2	300	0	0	0	0	0
113	111	N	2	2000	0	0	0	0	0
211	111	N	9	3000	0	0	0	0	0
161	111	N	3	2000	0	0	0	0	0
132	132	S	4	500	0	0	0	0	0
161	132	S	3	1000	0	0	0	0	0
212	161	S	9	200	0	0	0	0	0
113	152	S	7	500	0	0	0	0	0



## ANNEXES

111	152	S	3	1000	0	0	0	0	0
113	131	S	9	500	0	0	0	0	0
322	113	S	3	500	0	0	0	0	0
331	113	S	3	500	0	0	0	0	0
215	161	S	9	500	0	0	0	0	0
215	132	S	9	400	0	0	0	0	0
132	161	S	5	1000	0	0	0	0	0
215	113	S	9	800	0	0	0	0	0
183	111	N	5	800	0	0	0	0	0
183	112	N	6	1000	0	0	0	0	0
1711	113	S	8	700	0	0	0	0	0
1711	112	S	8	700	0	0	0	0	0
215	112	S	8	1000	0	0	0	0	0

## ANNEXE D :

### Classification hiérarchique des fonctions

#### 1. Bâtiments

##### 11. Logements

- 111. Logement individuel : hauteur = 6 m.
- 112. Logement collectif moyenne densité: hauteur = 9 m.
- 113. Logement collectif forte densité: hauteur = 15 m.

##### 12. Écoles

- 121. Ecole primaire
- 122. Ecole secondaire : collège, gymnase
- 123. Université, haute école
- 124. Crèche, jardin d'enfants

##### 13. Commerces

- 131. Commerce de proximité (boutique) : épicerie, boulangerie, kiosque, coiffeur, institut de beauté, fleuriste, auto-école,...
- 132. Supermarché
- 133. centre commercial
- 134. Magasin dépôt : dépôt vente, garage voiture, installateur sanitaire,...

## **ANNEXES**

- 135. (Santé) Médecin, psychologue,...
- 136. (Loi) Avocat, notaire, fiduciaire, assurance,...

### **14. Établissements de santé**

- 141. Dispensaire de quartier, centre médical
- 142. Hôpital, clinique
- 143. CHU (Centre Hospitalier Universitaire)

### **15. Bâtiments publics**

- 151. Bâtiment administratif : mairie, hôtel de ville,...
- 152. Lieux de culte
- 1521. Salle paroissiale, annexe de lieu de culte...
- 153. Cimetière
- 154. Musée
- 155. Bureau de poste
- 156. Banque
- 157. Bibliothèque
- 158. Salle polyvalente
- 159. Bâtiment de service public : feu, police, voirie, ...

### **16. Travail (fabriques)**

- 161. Bâtiment de bureaux
- 162. Atelier d'artisanat (peinture, céramique, plâtrerie, serrurerie, pépinière, ...)
- 163. Bâtiment industriel ... qui produit du bruit, de la pollution atmosphérique ...
- 164. Ferme

### **17. Loisirs**

#### **171. Sports**

- 1711. Bâtiment sportif
- 1712. Terrain de sport
- 1713. Piscine
- 1714. Bowling, billard...

#### **172. Culture**

- 1721. Théâtre, salle de spectacle...
- 1722. Cinéma
- 1723. Centre culturel

## **ANNEXES**

### **173. Détente**

- 1734. Discothèque
- 1735. Refuge

### **18. Services**

- 181. Restaurant, cafeteria
- 182. Hôtels
- 183. Station service

### **19. Divers : dépendances et bâtiments annexes**

- 191. Dépendances de villas, d'usines, etc., garages
- 192. Toilettes publiques
- 193. Bâtiments d'entretien électrique, etc.

## **2. Agents Réseaux**

### **21. Transports**

- 2111. Autoroute avec mur anti-bruit
- 2112. Autoroute sans mur anti-bruit
- 212. Route
- 213. Sortie d'autoroute
- 214. Parking
- 215. Gare
- 216. Aéroport
- 217. Arrêt de bus ou de métro
- 2181. Ligne de CFF ou de métro sans mur anti-bruit
- 2182. Ligne de CFF ou de métro avec mur anti-bruit

### **22. Réseaux de sous-sol**

- 221. Canalisations d'eau
- 222. Conduite de gaz

## **3. Environnement**

### **31. Topographie**

- 311. Sommet

## **ANNEXES**

### **32. Hydrographie**

321. Lac

322. Rivière, fleuve

### **33. Verdure**

331. Forêt

1731. Jardin familial

1732. Parc urbain de quartier

1733. Grand parc urbain

### **4. Bâtiment mixte**

**41. Logement / Commerce**

**42. Logement / Travail**

**43. Logement / Service**

**44. Travail / Commerce**

## CURRICULUM VITAE

**Vitor SILVA**

Rte de la Plaine 16  
1022 Chavannes, Switzerland  
Mobile : +41 78 629 1225  
Email: [vitor.novasilva@gmail.com](mailto:vitor.novasilva@gmail.com)

Age: 31  
Unmarried

Environmental/Geographic Information Systems engineer (EPFL)

### EDUCATION

---

**Since 2009 :** **PostDoc at ULG, Liège, Belgium**

*Title of the project:* Virtual model of the city of Liège in the eighteenth century- "Virtual Leodium"

**2006 - 2009 :** **PhD thesis in Geographic Information Systems, LaSIG lab, EPFL**

➤ *The exam is not yet passed but is coming soon (may 2010)*  
*Title of the PhD's thesis:* Design and evaluation of a multi-scale vector agent platform for the simulation of urban morphogenesis

**2004 - 2006 :** **M. Sc. in Environmental Science and Engineering, ENAC, EPFL**

Specialization on Industrial Ecology  
*Title of the master's thesis:* Introd. à l'hyp. d'ergodicité et aux mesures lidar

**2001 - 2003 :** **Environmental Science and Engineering, EPFL**

B. Sc. Degree equivalent

### PROFESSIONAL EXPERIENCE

---

**Since 10/2009:** **PostDoc, ULG, Liège, Belgium :** Posdoctoral studies at ULg (University of Liège), Geomatics Unit.

**8/2006-9/2009 :** **PhD Student, EPFL :** Assistance at UTA lab (Laboratoire de Projet Urbain, Territorial et Architectural) in collaboration with LaSIG lab (Laboratoire de Systèmes d'Information Géographique) and IGN (Institut Géographique National, France).

## CURRICULUM VITAE

**7/2005 - 10/2005:** **Training course, EPFL:** Trainee at LBE lab (Laboratoire de Biotechnologie Environnementale).

**1994 - 2004:** **Private Teacher, Lausanne:** Support to students with learning difficulties at CVAJ (Centre Vaudois d'Aide à la Jeunesse).

## SKILLS AND ACTIVITIES

---

**Languages :** **French :** mother tongue ; **English :** fluent ; **German :** basics ; **Spanish :** basics ; **Portuguese :** fluent.

**Informatics (sel.):** **Java :** excellent knowledge

**Eclipse, PostgreSQL, GeOxygene:** excellent knowledge

**SQL :** good knowledge

**FME:** good knowledge

**3D Studio Max:** good knowledge

**CityGML format:** good knowledge

LandXplorer, Manifold, Visual Paradigm, ArcGIS, MapInfo, Google Earth, Sketchup,

**Leisure :** Taekwondo, Volleyball, Biking, Reading, Dance, Theater.

## MAIN TOPICS OF THE *PHD THESIS*

---

- Java programming of a simulation prototype based on multi-agent systems
- Interaction modeling between spatial objects at different scales
- Modeling of the dynamic behavior between urban spatial objects
- Creation of urban evolution scenarios
- Creation of detection algorithms of urban structures
- Analysis and vectorial representation of 2D spatial objects
- Incorporation of 3D data and urban 3D descriptors
- Analysis and 2D/3D vectorial representation of the evolution of the urban built environment

## MAIN TOPICS OF THE *POSTDOC*

---

- Modeling of 3D objects with 3D Studio Max
- Translation from 3ds files to CityGML files with FME workbench

## CURRICULUM VITAE

- Adaptation of the CityGML standard for archeological purposes

## PUBLICATIONS

---

- Billen, R., Blain, P., Donneau, O., Habracken, S., Renotte, Y., **Silva**, V., Van Ruymbeke, M.: *Virtual model of the city of Liège in the eighteenth century- "Virtual Leodium"*. Proceedings of 3D Stereo MEDIA 2009, International 3D Stereo Film and Technology Festival (3D Stereo MEDIA), Liège, Belgium, 1-3 Dec. 2009.
- Carneiro, C.; Golay, F.; **Silva**, V.: *Incorporation of morphological properties of buildings' descriptors computed from GIS and LIDAR data on an urban multi-agent vector based geo-simulator*. ICCSA 2009.
- Carneiro, C.; Golay, F.; **Silva**, V.; Plazanet, C.; Park, J.J.: *GIS and LIDAR Data Analysis for the Integration of Multidimensional Indicators on Urban Morphogenesis Multi-agent Vector Based Geosimulation*. Geocomputation and Urban Planning: Studies in Computational Intelligence, B. Murgante, G. Borruso and A. Lapucci (Eds.), vol. 176, 2008, p. 187-208.
- **Silva**, V., Plazanet, C., Carneiro, C., Golay, F.: *3D LIDAR data application for urban morphogenesis multi-agent vector based geosimulation*. Lecture Notes in Computer Science: Computer Sciences and its Applications (ICCSA 2008), O. Gervasi et al., 2008, p. 179-193.
- Plazanet, C., **Silva**, V.: *Vector Approaches to urban morphogenesis modelling*. Poster on 10th GeoComputation Conference, 3rd-5th September, Ireland (2007).  
> Best Student Poster Award.