

MORPHOGENESE DE LA METROPOLE

Projet de recherche interdisciplinaire EPFL / VPAA / fonds 590612

RAPPORT FINAL

Rédaction : Dr Corinne PLAZANET

Aout 2008

Pr. Patrick BERGER

Laboratoire UTA

Institut INTER

Faculté ENAC



ÉCOLE POLYTECHNIQUE
FÉDÉRALE DE LAUSANNE

TABLE DES MATIERES

1	INTRODUCTION	10
	Définitions.....	10
	Métropole.....	10
	Morphogenèse.....	11
	Lois dynamiques.....	11
	modélisation et simulation.....	12
	Contexte de la recherche	13
	Historique du projet	14
	Articulation du présent document	15
2	LA PROBLÉMATIQUE	16
	Constats.....	16
	L'urbain : un système complexe, dynamique, autogène.....	16
	La nécessité de comprendre et représenter la morphogenèse.....	17
	Hypothèses	18
	Objectifs	19
3	ETAT DE L'ART.....	22
	La morphogenèse.....	23
	Les approches de la simulation urbaine.....	23
	Villes fractales	27
	Villes cellulaires	28
	Les agents cellulaires.....	28
	Les agents vecteur.....	29
4	LE PROJET	31

Positionnement et choix.....	31
Méthodologie Multi-Agent.....	31
Modélisation géographique Vecteur.....	32
Modélisation Multi-échelle.....	32
Chantiers de recherche.....	33
Chantier LOIS (ARCHITECTURE).....	34
Chantier GEOMATIQUE (S.I.G.).....	35
Chantier SIMULATION.....	36
Chantier VISUALISATION 3D.....	38
Zone d'étude.....	39
Ressources.....	40
Collaborations.....	41
Laboratoire LaSIG, faculté ENAC, EPFL.....	41
Laboratoire COGIT, IGN-France.....	41
Autres partenariats.....	41
5 LES LOIS DE MORPHOGENÈSE.....	42
Croissance naturelle et densité.....	42
Loi d'expansion.....	42
Loi d'économie d'espace (Densité).....	43
Décroissance de la densité parcellaire.....	45
Influence fonctionnelle.....	45
Fonctions.....	45
Influence fonctionnelle.....	45
Voisinage.....	47
Pouvoir symbolique.....	48
Vue.....	48
L'exposition (ensoleillement).....	49

Contraintes physiques	49
Distance de séparation minimum	49
Adéquation aux parcelles et à la zone d'affectation	50
La pente du terrain	50
Loi morphologiques	50
Les groupes d'habitat	50
Les systèmes urbains	57
Stabilité / instabilité (dynamique).....	60
Espérance de vie	60
Changement de programmation.....	60
Formation de bâtiments.....	61
Changement de pouvoir symbolique => Apparition	61
Changement d'influence fonctionnelle	62
6 MODÉLISATION DE LA MÉTROPOLE	63
Données de base	63
Le schéma conceptuel des données	65
Modélisation multi-échelle	65
Les objets construits.....	68
Les objets de l'environnement.....	80
La détection des groupes et des systemes.....	82
La détection des groupes.....	83
Détection des Systèmes urbains	92
7 LE MOTEUR DE SIMULATION MULTI-AGENT	95
Les Systèmes Multi-Agents (SMA).....	95
Analyse conceptuelle	97
Les agents vecteur et leur comportement.....	98
le modèle de communication	101

La croissance du système	108
La croissance.....	108
la Formation de services.....	109
L'espérance de vie (stabilité)	110
Evènements (perturbations)	110
La satisfaction des agents	112
Influence fonctionnelle et voisinage.....	112
Visibilité	117
La recherche de localisation.....	123
Recherche des points de localisation potentielle de meilleure satisfaction	123
Programmation et orientation des bâtiments à créer	125
Calibration et validation du modèle	127
8 VISUALISATION.....	128
Visualisation en 2D.....	128
Rendu dynamique 3D.....	128
9 ARCHITECTURE DU SYSTÈME	130
10 RÉSULTATS	132
Scénarios pour la prédiction	132
Scénario 1 : croissance naturelle	133
Scénario 2 : impact de l'implantation d'un nouveau programme.....	135
Simulation déterministe vs simulation Agent.....	137
Contexte de la simulation	137
Simulation déterministe	138
Simulation selon une approche multi-agents	139
Etapas de l'interaction	140
Publications	143

11 CONCLUSION.....	144
Résultats	144
Caractères innovants	144
Difficultés	146
Perspectives	149
12 BIBLIOGRAPHIE	151

TABLE DES ILLUSTRATIONS

Figure 1 : Image de ville SimCity 4 (source : http://simcity.ea.com/)	24
Figure 2 : Vues synchronisées de scénarios de simulation (année 2000 vs 2020) - Source [Caneparo et al, 2006]..	26
Figure 3 : Schéma synthétique des chantiers du projet.....	33
Figure 4 : Du couplage (schéma du haut) à l'intégration (schéma du bas) [Sanders, 2005].....	37
Figure 5 : Extrait d'orthophoto numérique couleur de la zone d'étude (source SwissTopo).....	39
Figure 6 : Illustration schématique de la loi d'économie d'espace	43
Figure 7 : La métropole lausannoise en 1974	44
Figure 8 : La métropole lausannoise en 2001 (Extraits de la carte nationale au 1:25'000 – Office fédéral de topographie).....	44
Figure 9 : Densité parcellaire fonction de l'éloignement du centre	45
Figure 10 : Loi de séparation minimum $h=l$	49
Figure 11 : Trois figures d'organisation élémentaires.....	52
Figure 12 : Commune de Saint-Sulpice dans l'ouest lausannois en 1900 (à gauche) et en 1940 (à droite).....	54
Figure 13 : Illustration schématique des lois de complétude et d'extension des groupes d'habitat.....	55
Figure 14 : Illustration de la loi de densification des îlots urbains	56
Figure 15 : Schéma conceptuelle de la base de données initiale.....	64
Figure 16 : Vue simplifiée de la modélisation multi-échelle de la métropole.....	66
Figure 17 : Extrait du schéma UML concernant les objets construits.....	68
Figure 18 : Indicateurs morphologiques des bâtiments	70
Figure 19 : Extrait du schéma UML concernant les objets construits.....	80
Figure 20 : Schéma UML concernant les groupes et les liens entre bâtiments	83
Figure 21 : Calcul du diamètre du buffer pour la détection des groupes d'habitat.....	85
Figure 22 : Validation des liens entre bâtiments selon les descripteurs de forme.....	86
Figure 23 : Qualification des groupes en fonction des angles	88
Figure 24 : Optimisation des formes à partir de la qualification des groupes d'habitats.....	88
Figure 25 : Résultat de la détection des groupes d'habitat moyenne densité sur la zone d'étude	89

Figure 26 : Zoom sur le résultat de différents groupes détectés.....	90
Figure 27 : Résultat de la représentation simplifiée des groupes d'habitat avec leur barycentre.....	91
Figure 28 : Représentation imagée d'un agent en interaction avec son environnement [Ferber, 1997].....	96
Figure 29 : Vue complète du schéma conceptuel UML	99
Figure 30 : Graphes de transition jumelés pour le scénario Demande d'action	104
Figure 31 : Graphes de transition jumelés pour le scénario Envoi d'information.....	105
Figure 32 : Diagramme UML des séquences.....	108
Figure 33 : Règle de formation des services. Exemple de l'école.....	109
Figure 34 : Règle d'espérance de vie des agents	110
Figure 35 : Calcul du degré de satisfaction d'un agent selon l'influence des programmes voisins.....	113
Figure 36 : Illustration du principe de calcul de degré de satisfaction selon l'influence fonctionnelle	114
Figure 37 : Méthode de calcul du degré de satisfaction des agents selon l'influence fonctionnelle.....	115
Figure 38 : Calcul du degré de satisfaction selon l'influence fonctionnelle, avec distinction entre logements et services	116
Figure 39 : Calcul du degré de satisfaction incluant la visibilité des bâtiments	117
Figure 40 : Construction du modèle de surface 3D urbain à partir des données LIDAR.....	119
Figure 41 : Méthodes d'analyse de la visibilité depuis les bâtiments.....	120
Figure 42 : Comparaison des résultats de simulation sur la zone de test sans (à gauche) / avec (à droite) prise en compte de l'indicateur de visibilité des bâtiments.....	121
Figure 43 : Résultat d'analyse de visibilité au lac depuis le toit d'un bâtiment de notre zone de test.....	122
Figure 44 : Points potentiels pour la localisation du bâtiment.....	123
Figure 45 : Intersection des buffers avec les surfaces existantes	124
Figure 46 : Localisation du polygone représentant le bâtiment sur le point retenu	124
Figure 47 : Algorithme de tirage aléatoire de la longueur des côtés du rectangle à générer.....	125
Figure 48 : Calcul des coordonnées du bâtiment à générer	126
Figure 49 : Bâtiments extrudés sur Google Earth au format KML	129
Figure 50 : Rendu 3D réaliste	129
Figure 51 : Architecture de la plateforme GeOxygene, principaux composants.....	130
Figure 52 : Architecture informatique du géosimulateur.....	131

Figure 53 : Croissance naturelle en 8 images	134
Figure 54 : Impact de l'implantation d'un grand programme sur la dynamique urbaine	136
Figure 55 : Développement urbain de la zone de Chavannes-près-Renens en 1971 avec les écoles secondaires existantes (entourées de bleu)	137
Figure 56 : Résultat de la simulation déterministe.....	138
Figure 57 : Groupes de bâtiments de type logement à créer dans les années 1970 dans la zone de Chavannes-près-Renens.....	139
Figure 58 : Schéma UML des agents intervenant dans le scénario	140
Figure 59 : Nouvelle école créée par simulation multi-agents	142

1 Introduction

DEFINITIONS

Notre recherche concerne la **modélisation** et la **simulation** de la **morphogenèse** des **métropoles** d'aujourd'hui sur la base des **lois dynamiques** qui les régissent. Nous définissons ci-dessous ces termes avant de présenter plus précisément le contexte de la recherche.

MÉTROPOLE

Le terme de **métropole** (vient du grec *mêtēr* : mère, et de *polis* : ville).

Dans l'Antiquité, l'acception de métropole désignait la ville d'origine des fondateurs d'une colonie. Par exemple, Phocée était la métropole de Massalia (Marseille aujourd'hui). Le terme de métropole peut aussi désigner la capitale politique ou économique d'un état ou d'une région. En France par exemple, le terme *métropole d'équilibre* (terme relatif à l'aménagement du territoire) désigne un grand centre urbain provincial pouvant contrebalancer Paris. Pour l'Église, la métropole est le chef-lieu d'une province ecclésiastique où siège l'archevêque métropolitain.

Nous retiendrons la définition de métropole comme étant une ville:

- ✓ concentrant une population relativement forte
- ✓ abritant des fonctions de gouvernance dans les domaines économique et financier
- ✓ influençant l'organisation des activités industrielles et tertiaires
- ✓ à la tête d'un réseau urbain
- ✓ ayant un pouvoir d'organisation
- ✓ représentant un lien avec l'échelon le plus élevé (sauf pour le cas de la capitale nationale)
- ✓ concentrant des emplois stratégiques

A l'échelle planétaire, une métropole est une ville de plusieurs millions d'habitants regroupant d'importants centres de décision, de gestion ou de transport. L'ONU retient le chiffre de 8'000'000 d'habitants. On peut ainsi citer 4 grandes métropoles mondiales: New York (États-Unis), Tokyo (Japon), Londres (Royaume-Uni) et Paris (France).

Une métropole à l'échelle nationale correspond le plus souvent à la ville qui se situe en tête du réseau urbain national. Certaines métropoles, comme Paris, Londres ou Athènes, occupent une position tellement démesurée par rapport aux villes qui les entourent qu'on parle de réseaux urbains dominés par une ville unique. D'autres pays connaissent un réseau bicéphale comme l'Italie (avec Rome et Milan) ou l'Espagne (avec Madrid et Barcelone) ou encore la Suisse (avec Genève et Zurich). Au contraire, certains pays disposent d'un réseau urbain plus équilibré, tels que l'Allemagne, le Canada ou

les États-Unis. De plus, aux États-Unis ou au Canada, certains états ou provinces possèdent une capitale et une métropole distinctes, l'une politique et administrative et l'autre économique et industrielle. Sur la côte du Nord-Est, par exemple, Albany et Québec sont respectivement capitales de l'État de New York et de la Province de Québec, tandis que New York et Montréal sont des métropoles.

MORPHOGENÈSE

Le terme de **morphogenèse** est encore peu usité en architecture. Il est utilisé principalement en biologie ou en physique [Basquias, 2004]. Notamment en biologie, il désigne les *processus de développement des formes d'un organisme* au cours de l'embryogenèse ou en Sciences de la Terre les processus de formation du relief de l'écorce terrestre (source <http://fr.wikipedia.org/wiki/>).

[Basquias, 2004] en propose une définition plus large : « On peut définir la morphogenèse comme le processus consistant à créer des formes. [...] Le terme de morphogenèse désigne d'abord 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.»

Dans les domaines de l'architecture et de l'urbanisme, la morphogenèse désigne les processus de création d'un ensemble de formes urbaines (théorie de la morphogenèse urbaine - source <http://fr.wikipedia.org/wiki/>).

Plus spécifiquement dans le cadre de notre projet, nous définissons la morphogenèse de la métropole comme la construction ou l'évolution de sa forme physique par les contraintes de l'environnement (pente du terrain, vue, nature ou affectation du sol, proximité ou éloignement d'objets influençant, opportunité, etc.), du niveau local (le bâtiment) au niveau global (l'enveloppe) en passant par le niveau intermédiaire du quartier (la pièce urbaine).

LOIS DYNAMIQUES

Nous partons de l'hypothèse que la morphogenèse est régie par des **lois** dont nous pouvons en expliciter une partie et les structurer afin de les modéliser pour la simulation.

Selon Pumain D. dans <http://hypergeo.free.fr/>, une **loi** est une formule générale énonçant une relation constante ou habituelle entre des phénomènes, ou encore la désignation des règles de comportement d'un phénomène plutôt invariants dans le temps et l'espace comme la "loi du moindre effort". Par exemple, la répartition de certains phénomènes géographiques a une forme régulière, c'est-à-dire que l'on retrouve systématiquement d'un lieu à l'autre ou dans des régions différentes ...

C'est bien les règles de comportements qui régissent les transformations de la ville que nous allons énoncer. Nous pensons que ces règles doivent être simples, ainsi que le mentionne [Basquias, 2004] : « Celui qui observe la variété des formes dans le monde et cherche à en comprendre les raisons doit impérativement identifier ces mécanismes naturels et comprendre la façon dont ils agissent pour produire des formes bien déterminées. Mais on risque alors de donner à l'étude de la morphogenèse une telle ambition qu'elle sera obligée d'aborder l'ensemble des sciences. Pour éviter ce risque, 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. »

Cependant ces lois ne sont pas stables, mais varient dans le temps. [Toshihiro et Yoshitsugu, 2006] ont travaillé sur l'analyse des changements d'occupation du sol au Japon sur la base de la grille raster (à 10 mètres) du territoire. Ils comparent les séries de données selon les changements de type d'occupation du sol de chaque cellule. Ils ont ainsi mis en évidence que les probabilités de transition des cellules varient dans le temps.

Toujours selon D. Pumain dans http://hypergeo.free.fr/article.php3?id_article=55, la **dynamique** (du grec dynamis "force") peut être définie comme un changement, ou devenir, résultant d'un jeu de forces. Nous définissons une **loi dynamique** comme le comportement qui régit un phénomène et qui peut varier dans le temps.

Ainsi nous verrons que chacune des lois énoncées ci-dessous sera susceptible de voir ces valeurs modifiées au cours du processus. C'est un des éléments de base de la dynamique du système.

L'objectif de ce chapitre est de lister et de structurer les lois dynamiques (du moins celles que nous connaissons et que nous avons pu observer à ce stade de l'étude) qui régissent la morphogenèse de la métropole afin de les modéliser au prochain chapitre.

MODÉLISATION ET SIMULATION

La **simulation** est la reproduction du comportement dynamique d'un système réel s'appuyant sur un modèle afin d'arriver à des conclusions applicables au monde réel selon [Ramat E., 2005].

Les simulations numériques scientifiques reposent sur la mise en œuvre de *modèles théoriques* utilisant souvent la technique dite des *éléments finis*. Elles sont une adaptation aux moyens numériques de la modélisation mathématique, et servent à étudier le fonctionnement et les propriétés d'un système modélisé ainsi qu'à en prédire l'évolution.

Les simulations informatiques sont rapidement devenues incontournables pour la modélisation des systèmes naturels complexes en physique, chimie et biologie, mais également des systèmes humains en économie et en science sociale. Les exemples sont nombreux : chute d'un corps, résistance d'une plateforme pétrolière à la houle, fatigue d'un matériau sous sollicitation vibratoire, usure d'un roulement à billes, écoulement de bassin versant, etc.

Il s'agit pour nous de reproduire numériquement les phénomènes physiques de morphogenèse des métropoles.

Pour ce faire, l'étape de **modélisation** (conception d'un modèle) est primordiale tant d'un point de vue **mathématique** afin de pouvoir analyser les phénomènes réels et d'en prévoir les résultats à partir de l'application d'une ou plusieurs théories à un niveau d'approximation donné, que d'un point de vue informatique afin de construire le modèle de données de notre système d'information géographique, base du moteur de simulation.

CONTEXTE DE LA RECHERCHE

Les Métropoles contemporaines : Un enjeu majeur pour l'environnement

Un grand chantier de recherche concerne l'état à venir des villes contemporaines : l'immensité de leur étendue, leur complexité extrême, l'accélération de leur développement et de leur transformation amène à constater que les modes de représentation d'une part, et d'autre part les méthodes de planification actuelle ne sont plus adaptées à ce nouvel état des choses.

Cette recherche s'inscrit dans cette perspective en désignant 2 grandes questions à résoudre :

1°) Comprendre et expliquer la dynamique urbaine :

Par l'invention d'une représentation phénoménologique de la ville et non plus statique.

2°) Maîtriser la dynamique urbaine :

Avec cette nouvelle représentation qui introduit les notions d'effet dans le temps de toute opération architecturale et urbaine, rechercher un autre outil opératoire pour la planification en particulier en explorant le principe de prédiction.

Les résultats escomptés sont ainsi de 3 natures :

1. La création d'une nouvelle forme de représentation des métropoles.
2. La prédiction d'effets à l'échelle de la ville et différés dans le temps de toute opération architecturale.
3. L'utilisation de la connaissance de ces effets pour d'une part mieux maîtriser l'auto-organisation des villes contemporaines, voire même engager le concept de dynamique « préconçu » comme nouvelle forme de conception et de planification urbaine.

Il est bien évident qu'au vu du temps et des ressources à disposition, et du fait du caractère fondamental de cette recherche, nous ne visons pas l'obtention d'un résultat directement applicable. Notre but est bien de démontrer l'intérêt d'une telle recherche et la faisabilité de la démarche envisagée.

HISTORIQUE DU PROJET

A l'origine, le professeur Patrick Berger et son équipe, composée notamment des collaborateurs scientifiques Philippe Bonhôte et Bassel Farra (Dr en architecture), se sont intéressés à la morphogenèse de la métropole depuis de nombreuses années.

C'est en 2004 que le projet est initié avec le soutien de la direction de l'école.

Et en 2005, il démarre concrètement le 1^{er} septembre avec l'engagement de Corinne Plazanet, chef de projet et Dr ingénieure en géoinformatique, et ce pour une durée de 3 ans, soit jusqu'au 31 août 2008.

1^{ère} année : septembre 2005 à août 2006

L'équipe de projet est alors composée de la cheffe de projet Corinne Plazanet (à 100%, exception faite d'un 10% de charge de cours) et d'architectes :

- ✓ le professeur Patrick Berger, directeur du laboratoire UTA et initiateur du projet
- ✓ les collaborateurs scientifiques Philippe Bonhôte et Dr Bassel Farra, à raison de plusieurs séances par mois
- ✓ le doctorant en architecture Jong-Jin Park, engagé sur le projet dans le courant de cette première année à 75%

Ce contexte de collaboration interdisciplinaire nous a permis de définir les objectifs de la recherche, et de mettre en place l'approche proposée en 4 grands chantiers. Nous avons également pu proposer une première ébauche de structuration et de modélisation des grandes lois de morphogenèse de la métropole.

Sur cette base, nous avons démarré les travaux de recherche pour la conception et la mise en œuvre d'un outil de simulation dynamique de la morphogenèse de la ville. La première année de recherche a ainsi abouti concrètement à la réalisation d'un premier prototype.

2^{ème} année : septembre 2006 à août 2007

Durant cette 2^{ème} année, l'équipe s'est enrichie de 2 nouveaux membres :

- ✓ le doctorant en géoinformatique Vitor Silva, ingénieur EPFL en Sciences de l'Ingénierie de l'environnement, engagé à 75% pour une durée de 3 ans (jusqu'en août 2009)
- ✓ l'architecte EPFL Andrea Calanchini pour un mandat de 4 mois à 40% de septembre à décembre 2006

Cette année charnière a consisté principalement à réaliser :

- ✓ Un rapport détaillé et chiffré des données d'influence de programme à programme sous forme d'ensemble de lois structuré

- ✓ La migration du premier prototype sous Manifold vers un système ouvert (plateforme opensource GeOxygene) intégrant les limites mises en évidence dans le premier prototype et permettant la programmation de la communication entre agents

3^{ème} année : septembre 2007 à août 2008

Cette dernière année a conduit à deux résultats essentiels et prometteurs :

- ✓ la programmation de la communication entre agents et les premiers résultats de simulation multi-agents (doctorat de Vitor Silva)
- ✓ la mise en place du modèle multi-échelle de la ville et l'intégration des groupes (niveau meso) dans le moteur de simulation comme agent meso (doctorat de Jong-Jin Park avec l'assistance informatique de Corinne Plazanet)

ARTICULATION DU PRESENT DOCUMENT

Le présent rapport a pour objectif d'offrir un bilan synthétique de ces 3 années de projet de recherche. Il s'articule comme suit :

- ✓ Le chapitre suivant (chapitre 2) présente la problématique de la morphogenèse des métropoles : constat sur l'évolution des métropoles d'aujourd'hui, hypothèses issues de ces constats et retenues dans le cadre de cette recherche et objectifs qui en découlent.
- ✓ Le chapitre 3 fournit un état de l'art détaillé partant d'une vision globale sur les travaux de simulation urbaine, et aboutissant aux approches les plus similaires à la notre.
- ✓ Le projet est présenté au chapitre 4 : positionnement, étapes de recherche, ressources et collaborations.
- ✓ Le chapitre 5 reprend les lois de morphogenèse telles que nous les avons structurées et modélisées pour le projet.
- ✓ Le modèle multi-échelle de la métropole, suivi du modèle de données vecteur multi-niveau qui en découle, est présenté au chapitre 6 du présent document.
- ✓ Le chapitre 7 décrit le moteur de simulation sur la base du modèle et des lois présentés aux chapitres précédents.
- ✓ Le chapitre 8 évoque la problématique de la visualisation dynamique 3D des résultats de simulation.
- ✓ L'architecture informatique du moteur de simulation est brièvement décrite dans le chapitre 9.
- ✓ Les résultats obtenus sont présentés et commentés au chapitre 10.
- ✓ Le dernier chapitre présente nos conclusions et évoque les perspectives de recherche issues de ce premier projet sur la morphogenèse urbaine.

2 La problématique

CONSTATS

Dans le cadre de ce projet, nous considérons la ville dans sa matérialité : les programmes (i.e. un ou plusieurs bâtiments pouvant accueillir une ou plusieurs fonctions telles que logements, commerces, bureaux, écoles, etc.) en interaction avec leur environnement naturel (sol, lac, rivières, etc.) et construit (infrastructures routières, ferroviaires, etc.).

On constate qu'il devient difficile de comprendre et a fortiori de maîtriser la forme et la dynamique des métropoles contemporaines. La richesse des interactions entre les programmes, et avec leur environnement naturel et construit à plusieurs échelles, nous conduit à la considérer comme un système complexe dynamique, autogène, en ce sens qu'il est régi par ses propres lois de morphogenèse de l'échelle locale à l'échelle globale.

A l'échelle locale, la localisation des programmes architecturaux obéit non seulement aux lois d'architecture et d'urbanisme, et aux préférences des architectes, mais également aux lois liées à leur usage et à leur rapport à leur environnement. A l'échelle régionale, la métropole elle-même obéit à son environnement tout en induisant, de part son identité et sa morphologie propre, la localisation des programmes.

L'URBAIN : UN SYSTÈME COMPLEXE, DYNAMIQUE, AUTOGÈNE

La ville contemporaine aujourd'hui est un système complexe et instable. Il devient extrêmement difficile d'en comprendre et a fortiori d'en maîtriser la forme et l'évolution.

Selon [Versteegh, 2005] en page 38, « ce système est *adaptatif* dans le sens où il ne se 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, ou 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. »

Ce constat nous amène à considérer la métropole d'aujourd'hui comme un système complexe organique, en ce sens qu'il est régi par ses propres lois de morphogenèse de l'échelle locale à l'échelle globale.

A l'échelle locale, la localisation des programmes architecturaux¹ obéit non seulement aux lois d'architecture et d'urbanisme, et aux préférences de l'architecte, mais également aux lois liées à sa fonction et à son rapport à l'environnement naturel (sol, lac, rivières, etc.) et construit (programmes voisins, identité et morphologie de la zone ou du quartier, infrastructures routières, etc.).

A l'échelle régionale, la métropole elle-même obéit à son environnement tout en induisant, de part son identité et sa morphologie propre, la localisation des programmes.

La richesse des interactions entre les programmes, avec leur environnement naturel et construit, et à travers les échelles conduit à considérer la métropole comme un système complexe, dynamique, et dont nous ne maîtrisons pas (plus ?) la morphogénèse aujourd'hui.

LA NÉCESSITÉ DE COMPRENDRE ET REPRÉSENTER LA MORPHOGENÈSE

La complexité de la métropole d'aujourd'hui conduit à la nécessité de développer de nouveaux outils qui permettent de comprendre et de représenter les transformations induites par la localisation et l'impact des programmes, afin si possible de maîtriser la morphogénèse des métropoles urbaines d'aujourd'hui.

« La ville est en perpétuelle crise et les seuils sensibles de ses états successifs sont autant de signes qui permettent de saisir les transformations formelles et globales d'un milieu qui ne doit pas seulement à l'établissement humain ses caractéristiques physiques. Le milieu 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], page 13.

Une nouvelle représentation phénoménologique de la métropole est :

- nécessaire du fait de la nouvelle complexité de la ville : les représentations courantes sous la forme de cartes (statiques) ne sont plus adéquates,
- importante car de tout temps l'homme a cherché à représenter son milieu afin de le comprendre et de le projeter,
- urgente afin d'en maîtriser la complexité et de vivifier le lien entre architecture et urbanisme.

¹ Un programme architectural est défini comme un bâtiment ou un ensemble de bâtiments pouvant accueillir une ou plusieurs fonctions telles que logements, commerces, bureaux, écoles, etc.

HYPOTHESES

C'est le programme qui créé la dynamique de la ville

La localisation stratégique d'un programme quel qu'il soit a une incidence importante sur son environnement, et plus largement sur la morphogenèse de la métropole en ce sens qu'il réoriente son développement. Ainsi un programme architectural modèle la forme de la ville par son impact sur son environnement bâti plus ou moins proche. La ville aura tendance à "s'organiser" en fonction de ces programmes.

La ville a un fonctionnement analogue à celui de tout organisme vivant

La ville est analogue à un organisme vivant qui s'organise selon ses lois pour assurer sa survie et l'adaptation aux contraintes du milieu dans lequel il vit. Cette conception a été proposée par le Prof. Patrick Berger. Il en déduit que la ville est régie par ses propres lois de morphogenèse de l'échelle locale et à l'échelle globale.

La ville est régie par un principe d'intelligence collective

Aujourd'hui nous n'avons plus à faire à la planification hiérarchique telle qu'au moyen âge. Selon [Verteegh, 2005], p. 36, « 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. » C'est alors une question de gouvernance qui se pose. Qui gouverne la programmation de la ville ? Il semble que la planification actuelle soit de type « horizontale ». Autrement dit chacun fait comme bon lui semble autour des grands programmes planifiés.

Selon [Berger et Nouhaud, 2004], p. 184 : « 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. »

La ville contemporaine est un **système complexe doté d'une architecture cognitive qui répond à un principe d'intelligence collective, par analogie au fonctionnement de tout organisme vivant**. P. Verteegh, p. 36, parle de « processus de type biologique, fondé sur une autogenèse d'ordre réticulaire, fait de structures émergentes, de singularités et de verrouillages. »

L'agencement spatial de la ville est symétrique

La ville semble suivre des lois d'évolution quant à sa forme. On observe d'une part que la ville est constituée de formes anthropomorphiques simples (alignement, carrés, cercle, etc.) issues des lois d'organisation spatiales humaines. D'autre part, ces invariants de forme se regroupent naturellement

en systèmes bien distincts par complétude, extension ou densification jusqu'à saturation, assurant ainsi une configuration optimale d'un point de l'économie d'espace, de matériaux et de liens à l'environnement.

Les systèmes à notre disposition ne nous permettent pas de comprendre la morphogénèse

Les systèmes développés aujourd'hui pour modéliser la ville et en simuler son développement sont insuffisants comme le montre [Berger et Nouhaud, 2004], p. 184 : « Ce que la mathématisation de la ville nous permet de comprendre des formes, cette part intermédiaire qui échappe à notre observation et à notre savoir, nous conduit à résumer son histoire à quelques traits, insuffisants pour ce faire puisque l'état physique résultant de l'auto-organisation des phénomènes volontaires, naturels et catastrophiques n'est pas compris dans une unité sensible et conceptuelle et interprétée comme telle. Cette part est en quelque sorte cachée, et les formes cachées qui en résultent sont le fruit de l'auto-organisation qui se fait sans nous. Nous continuons à analyser la ville par catégories, réduisant l'objet de l'étude à une juxtaposition de significations spécialisées et de schémas qui, pour être utiles à la compréhension de phénomènes particuliers, sont insuffisants pour donner une image globalisante de l'invention des formes urbaines. »

OBJECTIFS

Si nous souhaitons un jour pouvoir expliquer les mécanismes de la morphogénèse des métropoles urbaines d'aujourd'hui et si possible les maîtriser, sa complexité nous conduit à la nécessité de développer de nouveaux outils qui permettent de comprendre et de représenter les transformations induites par la localisation et l'impact des programmes.

Ces nouveaux outils devront intégrer tout notre savoir tant architectural, que géographique, mathématique, informatique, physique, voire biologique.

« La ville est en perpétuelle crise et les seuils sensibles de ses états successifs sont autant de signes qui permettent de saisir les transformations formelles et globales d'un milieu qui ne doit pas seulement à l'établissement humain ses caractéristiques physiques. Le milieu comme bien des organismes vivants, s'auto transforme. 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, p.13].

Une nouvelle représentation phénoménologique de la métropole et de sa morphogénèse est :

- ✓ nécessaire du fait de la nouvelle complexité de la ville : les représentations courantes sous la forme de cartes (statiques) ne sont plus adéquates,
- ✓ importante car de tout temps l'homme a cherché à représenter son milieu afin de le comprendre et de le projeter,
- ✓ urgente afin d'en maîtriser la complexité et de vivifier le lien entre architecture et urbanisme.

A partir des hypothèses posées, il nous paraît fondamental de pouvoir visualiser les transformations de la ville induites par l'implantation d'un nouveau programme afin d'en évaluer la qualité, et de faciliter l'aide à la décision au décideur (politique, urbaniste, aménagiste, architecte, ingénieur, etc.).

L'objectif de ce projet de recherche est de développer un prototype de visualisation dynamique 3D de la morphogenèse de la métropole simulée sur la base des lois que nous aurons énoncées dans le but de :

- ✓ Valider les hypothèses des architectes sur la métropole contemporaine aujourd'hui,
- ✓ Donner à voir ces lois aux étudiants et à tout public concerné,
- ✓ Fournir un outil d'aide à la décision simple, réaliste et efficace.

Un tel outil devra permettre de « jouer » avec les lois dynamiques afin d'observer et d'analyser les scénarios d'évolution de la ville autour des grands programmes planifiés, et de valider ces hypothèses.

La première grande problématique que nous abordons dans ce projet concerne les phénomènes qui appartiennent à la localisation des programmes et à leur impact dans la ville : à quelles lois la localisation des programmes obéit-elle ? Quelles incidences provoquent-ils sur le paysage urbain voisin ?

Pour cela, il est nécessaire de procéder à une analyse tant qualitative que quantitative de la ville qui permette d'explicitier les lois qui régissent la dynamique des objets naturels et construits constituant la ville, afin de pouvoir les quantifier sous forme de lois de probabilité et les modéliser mathématiquement.

L'énoncé de ces lois nous permettra d'enrichir la représentation SIG de la ville nécessaire à la simulation de sa morphogenèse.

La visualisation dynamique en 3D a pour objectif de fournir un outil à la fois didactique et d'aide à la décision simple et efficace.

En résumé, les objectifs de cette recherche sont de :

Démontrer que c'est le PROGRAMME qui crée la DYNAMIQUE de la ville

Valider (ou invalider) les hypothèses des architectes sur la métropole contemporaine.

COMPRENDRE la dynamique de la ville aujourd'hui

Montrer l'adéquation de l'approche scientifique choisie (agent vecteur).

Proposer une nouvelle REPRESENTATION PHENOMENOLOGIQUE

Proposer une représentation dynamique abstraite qui mette en évidence les lois.

Donner à voir et expliquer ces lois aux étudiants et à tout public concerné.

SIMULER la morphogenèse des métropoles

Développer un prototype de visualisation dynamique 3D de la simulation sur la base des lois énoncées.

Expérimenter pour déduire le système d'interaction à l'œuvre aujourd'hui.

Proposer des SCENARI I du futur

Fournir un outil d'aide à la décision pour politique, urbaniste, aménagiste, architecte, ingénieur, etc.

Dans le but de :

- 1) montrer l'impact du choix d'implantation de programme,
- 2) Décider de l'implantation de programme pour obtenir une configuration souhaitée (stratégie urbaine)

3 Etat de l'art

Les systèmes développés aujourd'hui pour modéliser la ville et en simuler son développement sont insuffisants comme le montre [Berger et Nouhaud, 2004]. Les recherches sur la morphogenèse urbaine sont encore rares. Hormis les nombreux travaux sur la morphogenèse de villes en particulier, peu de recherches abordent les lois générales qui régissent la morphogenèse, excepté l'architecte Christopher Alexander qui dès 1964 a tenté de structurer nos connaissances sous forme de lois simples [Alexander, 2005], [Alexander, 1987].

D'un point de vue géoinformatique, le système urbain n'a pas fait l'objet d'une formulation scientifique satisfaisante en raison de sa complexité [Salingaros, 2005]. Il existe nombre de systèmes de simulation de l'urbain d'un point de vue physique qui sont en cours de développement, notamment : OBEUS (environnement de simulation urbaine à vocation générique) [Benenson et Thorrens, 2004], URBANSIM (modèle de simulation intégrant les interactions entre l'occupation du sol, les transports, et l'ordre public à l'usage des services d'aménagement) [Waddell et al, 2003], URBANLAB (simulation d'impact de grands programmes – illustration ci-dessus) [Caneparo et al, 2006].

Les **automates cellulaires** se sont avérés intéressants pour la modélisation dynamique bien que les études intégrant l'approche SIG aient obtenu des résultats variables [Batty, 2005]. La ville, système complexe s'il en est, intégrant une grande variété d'objets spatiaux qui interagissent les uns les autres de façon complexe, non linéaire, voire imprévisible, s'avère dépasser les capacités des automates standard [Hammam et al, 2003].

Pour palier à ces limites, de nombreux auteurs (dont les références ci-dessus) introduisent la modélisation multi-agent, ce qui conduit aux **agents cellulaires**. Les systèmes multi-agents sont prometteurs pour modéliser les dynamiques spatiales. Cependant les limites rencontrées sont les mêmes que celles des AC, la modélisation des objets restant limitée par l'utilisation de la grille.

Tout comme les agents sont plus flexibles que les automates cellulaires, les **agents vecteur** sont plus appropriés que les agents cellulaires pour modéliser la ville [Hamman et al, 2003]. Leur usage est un retour à une façon de modéliser naturelle [Ferrand, 2000], en permettant de gérer chaque entité spatiale comme un agent plutôt que comme un ensemble de cellules et ainsi de manipuler la dynamique et les relations topologiques entre objets spatiaux irréguliers.

Il n'existe encore que peu d'approches SIG fondées sur la modélisation multi-agent basée vecteur. Les travaux les plus remarquables à ce jour, issus du laboratoire COGIT (IGN-France), concernent l'automatisation de la généralisation cartographique [Lamy et al, 1999], [Duchêne et Regnaud, 2002], et sont notre principale source d'inspiration pour la simulation de la morphogenèse urbaine.

L'état de l'art ci-après détaille les travaux répertoriés sur les différentes thématiques qui nous concernant : morphogenèse, simulation urbaine en général et approches scientifiques de simulation de la ville.

LA MORPHOGENESE

Les recherches fondamentales sur les processus de morphogénèse de la métropole sont encore rares à ce jour. Il existe divers travaux sur la morphogénèse de villes en particulier : Paris, Lyon, Gênes, Brême, etc. Cependant peu de recherches abordent les règles générales qui régissent la morphogénèse.

Christopher Alexander a été le premier architecte qui a souligné la présence de configurations et de lois de la conception architecturale et de la ville comme processus [Alexander, 2005], [Alexander, 1987], [Alexander, 1979].

Récemment, il a continué sa recherche : "l'ordre de la nature et de l'architecture" basée sur des processus semblables à ceux de la physique, de la chimie et de la biologie. En particulier, il énonce que la ville est un système vivant et complexe et que les processus de la ville s'expliquent par "*structure-preserving process*."

Nous nous basons en partie sur ses écrits afin de poser la définition des lois de morphogénèse présentés dans la suite de ce document.

LES APPROCHES DE LA SIMULATION URBAINE

SIMULATION DU FONCTIONNEMENT URBAIN DU POINT DE VUE SOCIAL

On trouve dans la littérature énormément de travaux sur la simulation urbaine dans de nombreuses thématiques sociales telles que la simulation de trafic routier ([El hadouaj et al, 2001]), la simulation des flux piétons ([Antonini et al, 2006]), les dynamiques de population ([FRANKHAUSER et al, 1995], [Vanbergue et Drogoul, 2002]), le marché de l'immobilier ([Zimmermann, 2006], [Devisch et al, 2006]), pour n'en citer que quelques uns.

D'un point de vue plus général, des équipes de recherche cherchent à simuler le fonctionnement d'une ville (software UrbanSim <http://www.urbansim.org/>), l'évolution d'une population entièrement virtuelle - projet NewTies <http://www.new-ties.org/tiki/tiki-index.php>, ou bien encore les conflits internationaux (groupe de recherche ETH Zurich <http://www.icr.ethz.ch/>).

LES JEUX : SIMCITY, CAESAR III

Dans le domaine du fonctionnement social de la ville, nous pouvons citer les jeux les plus connus : SimCity ou Cesar III qui permettent au joueur de construire sa ville.

SimCity (<http://fr.wikipedia.org/wiki/SimCity>, <http://simcity.ea.com/>) est le premier jeu vidéo de gestion de ville. Le joueur se trouve à la place d'un maire (assez proche d'un dieu) qui peut construire où il le souhaite des bâtiments, routes, fils électriques et autres infrastructures indispensables. Il peut régler les impôts, le budget de l'éducation, de la police, des pompiers, bref le joueur doit tout faire pour que sa ville plaise aux Sims (les habitants), dans le cas contraire il est renvoyé. Des statistiques et des graphiques montrant le degré de satisfaction des citoyens, les violences, la pollution et le niveau scolaire sont à sa disposition.

Partant de zéro lors d'une nouvelle partie, la ville grandit différemment suivant le terrain et les actions du joueur. Ainsi chaque partie est différente de la précédente. Un deuxième mode de jeu est disponible, le mode "catastrophe". Dans celui-ci, la ville est déjà construite et bien développée mais des catastrophes surviennent, telles que des raz-de-marée, des incendies, des émeutes ou encore la venue de Godzilla. Le but est de minimiser les dégâts causés, puis de les réparer tout en gardant les citoyens satisfaits.



Figure 1 : Image de ville SimCity 4 (source : <http://simcity.ea.com/>)

Caesar III (http://fr.wikipedia.org/wiki/Caesar_3, <http://www.caesar3.com/>) est un jeu de gestion sous l'empire Romain, édité par Sierra, sorti en 1998. Ce jeu a pour but de construire et d'administrer, à la manière d'un SimCity, une cité romaine. Le but du jeu est ainsi de développer des cités romaines à travers tout l'empire Romain, avec des défis de plus en plus difficiles à réaliser. Tout commence par quelques colons qui vous suivent et commencent à aménager les premières structures sur le lieu choisi pour l'édification de votre cité :

- ✓ Des chantiers navals, des docks, des fermes (de blé, d'olives ou de fruits) pour produire la nourriture
- ✓ Des greniers et des marchés pour stocker et distribuer la nourriture
- ✓ Des préfetures pour combattre les incendies et la criminalité
- ✓ Des puits et des aqueducs pour approvisionner les habitants en eau potable.
- ✓ Des casernes, des murs, des corps de garde et des tours pour parer aux invasions des gaulois et autres barbares agressifs.
- ✓ Des temples dédiés aux dieux : Cérès, Déesse de l'agriculture; Neptune, Dieu du commerce et de la mer ; Mercure, Dieu des marchands, Mars, le dieu de la guerre et Vénus, déesse de l'amour.

 LES SYSTEMES DE SIMULATION AVEC VISUALISATION 3D

Il existe un certain nombre de systèmes de simulation de l'urbain d'un point de vue physique qui concernent différentes échelles, et qui sont en cours de développement. Nous citons ci-dessous les systèmes qui nous paraissent les plus proches de nos préoccupations :

Gigapolis (http://www.ncgia.ucsb.edu/projects/gig/project_gig.htm)

Gigapolis est la structure urbaine croissante contenant des milliards de personnes dans le monde entier. Les règlements urbains et leur connectivité seront le fil conducteur du changement global durant le vingt et unième siècle. Affectant profondément le sol, les ressources hydrologiques et atmosphériques, la dynamique urbaine a maintenant dépassé l'échelle régionale des *megalopolis* et doit être considérée comme un phénomène à l'échelle continentale et globale. Le projet *Gigapolis* prolonge et affine le modèle de croissance urbaine de Clarke en permettant des prédictions régionales, continentales et voire globales.

OBEUS [Benenson et al, 2005], [Benenson et al, 2001]

OBEUS (Object Based Environment for Urban Simulation) est un environnement de simulation urbaine à vocation générique qui combine l'approche par automates cellulaires et Système Multi Agent. Le système inclut deux types d'objets géographiques :

- ✓ Les automates fixes : qui ne changent pas de position dans le temps (bâtiments, carrefours, parcelles, etc.)
- ✓ Les automates mobiles : qui changent de position dans le temps (piétons, véhicules, propriétaires, etc.)

UrbanSim [Waddell et Ulfarsson, 2004], [Waddell et al, 2003], [Waddell, 2002]

UrbanSim est un modèle de simulation pour la planification intégrée et l'analyse du développement urbain, intégrant les interactions entre l'occupation du sol, les transports, et l'ordre public à l'usage des services d'aménagement pour interfacer les modèles de transports existants avec de nouvelles possibilités de prévision et d'analyse de l'occupation du sol.

UrbanLab [Caneparo et al, 2006]

UrbanLab est un système de simulation d'impact de grands programmes, développé par l'équipe du Polytecnico de Torino (équipe de 20 personnes travaillant depuis plus de 5 ans). C'est un des rares systèmes qui combine simulation et visualisation 3D pour la comparaison entre l'existant et l'impact d'un nouveau projet simulé.

Le résultat est une visualisation 3D dans une salle pouvant accueillir jusqu'à 100 personnes avec un vélo qui permet la navigation temps réel. La méthode développée consiste à choisir une nouvelle implantation de programme après discussions entre les personnes présentes concernées. Puis une simulation des développements futurs induits est calculée par le système (une nuit de calcul) et fait l'objet d'une évaluation lors d'un retour à la visualisation 3D par comparaison de l'existant et de la simulation obtenue. Des modifications sont apportées au projet dans le cas où la solution ne paraît pas satisfaisante.

La simulation est basée sur un moteur d'agents cellulaires. Le calcul de localisation prend en compte une carte des proximités maximales à la verdure et d'ensoleillement maximal, ainsi que les influences d'attraction / répulsion entre les cellules selon leurs fonctions.

La ville de Turin a ainsi menée une étude de cas pour la nouvelle ligne ferroviaire à implanter dans la vallée alpine (cf la figure ci-dessous). Quatre scénarii ont été évalués : amplifier les routes transversales à la vallée, amplifier les corridors de verdure, ... pour les présenter aux décideurs et au public afin qu'ils puissent comparer le présent et des scénarios futurs.

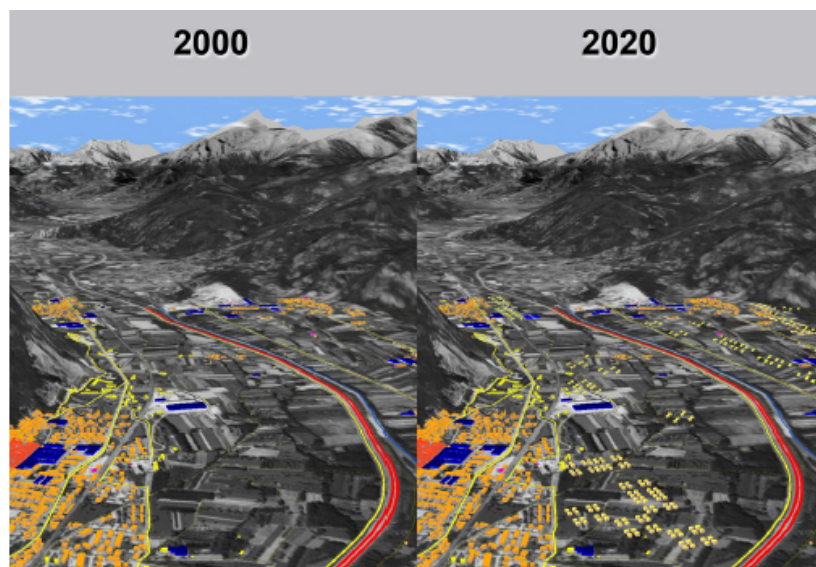


Figure 2 : Vues synchronisées de scénarios de simulation (année 2000 vs 2020) - Source [Caneparo et al, 2006]

Projet Néerlandais [Borsboom et al, 2006]

L'agence environnementale des Pays Bas essaie le même type d'approche à l'échelle du pays, pour visualiser une simulation de l'occupation du sol en 2030 selon plusieurs scénarios : globalisation versus décentralisation.

La simulation est également basée sur les agents cellulaires. L'équipe de développement mentionne également des difficultés liées à la structure raster trop artificielle, et aux problèmes de temps de calcul.

SIMULATION DE L'EXPANSION URBAINE

Concernant le développement physique de la ville, de nombreuses études, notamment en analyse spatiale, ont abordé la simulation de l'expansion de la ville en terme de limite géométrique, en lien avec l'accroissement de population. On citera notamment le livre de [Pumain et al, 1989].

SIMULATION DE L'OCCUPATION DU SOL

Divers auteurs abordent la problématique de simulation de l'occupation du sol [Arentze et al, 2006], [Toshihiro et Yoshitsugu, 2006], [Ma et al, 2006], [White et Engelen, 1993], etc.

L'équipe de Timmermans notamment [Arentze et al, 2006], [Ma et al, 2006], [Ma et al, 2005], [Ma et al, 2004] développent une méthode de génération de plans d'occupation du sol, à l'échelle régionale, pour l'optimisation des zones à aménager ou réaménager (pas de prédiction).

L'approche est basée sur les agents cellulaires, et est développée en C indépendamment d'un SIG. L'agent est la cellule qui a pour objectif de recevoir l'occupation du sol la plus adéquate pour lui. La méthode combine une heuristique pour la planification de localisation de services (*suitability* de la cellule) avec un mécanisme existant d'*allocation* d'occupation du sol sur un système de zonage : la grille (cellule = 200x200 mètres).

VILLES FRACTALES

Divers auteurs ont mené des travaux de recherche depuis une vingtaine d'années sur la fractalité des villes, que ce soit pour l'analyse des formes ou pour la construction de villes optimales : [Badariotti, 2005], [Batty, 2005], [Batty et Longley, 1996], [Batty et al, 1993], [Franhauser, 2003], [Franhauser, 1994], [Franhauser, 1991], [White et Engelen, 1993]

L'équipe de Batty notamment propose une des premières recherches sur l'utilisation de la géométrie fractale pour la compréhension et la planification de la forme physique des villes. Elle montre comment les villes évoluent et se développent a priori de manière irrégulière, mais ce qui, une fois compris en termes de fractales, illustrent l'ordre qui régit leur complexité et leur diversité.

La géométrie fractale peut en effet décrire les formes complexes, révéler leur ordre caché et leur régularité.

Toute ville, même "planifiée", qui utilise une géométrie euclidienne et des formes simples, s'est adaptée à son environnement naturel, et contient donc une croissance "organique" et des irrégularités.

De telles applications peuvent être la visualisation par des modèles d'ordinateur basés sur la géométrie fractale, mesurant des modèles de villes réelles et de leur simulation dynamique en examinant les frontières, les réseaux, les hiérarchies, la texture urbaine et la densité de population.

Si les villes appartiennent à la géométrie fractale, alors des invariants de forme devraient être retrouvés à différentes échelles : c'est la notion de *self-similarité*.

VILLES CELLULAIRES

Les **automates cellulaires (AC)** sont une technique de modélisation basée sur le modèle raster (grille) très largement utilisé depuis les années 1980-1990 pour la simulation de l'occupation du sol : les états de cellules représentent la couverture du sol ; la transition d'une cellule d'un état à l'autre dépend des états des cellules voisines [Hammam et al, 2003].

Les AC se sont avérés intéressants pour la modélisation dynamique bien que les études intégrant l'approche SIG aient obtenu des résultats variables [Batty, 2005], [Batty et al, 1999], [Batty et Xie, 1994]. La majeure partie de ces travaux a porté sur la simulation urbaine afin de comprendre la croissance urbaine et sa forme.

Cependant la ville, système complexe s'il en est, s'avère dépasser les capacités des AC standard [Hammam et al, 2003]. Les systèmes urbains intègrent une grande variété d'objets spatiaux qui interagissent les uns les autres la plupart du temps de façon complexe, non linéaire, voire imprévisible. De nombreux travaux dont [Ward et al, 1999] et [Jiang et Gimblett, 2002] ont clairement mis en évidence les limites de l'approche par AC.

Pour établir des modèles qui représentent des problèmes géographiques concrets, il semble nécessaire de mettre au point les AC les plus complexes avec une dynamique contrainte [Engelen et al, 1997].

De nombreuses tentatives ont été proposées pour développer un AC plus flexible [Couclelis, 1985], [Li et le Yeh, 2000], [Engelen et al, 1997]. Ce dernier a développé un outil de support basé modèle dans des secteurs urbains complexes, basé sur un AC contraint. Il a contraint la dynamique globale du modèle du AC par un couplage avec des modèles d'interaction spatiaux dynamiques plus traditionnels, fonctionnant sur un ensemble de régions beaucoup plus larges que les cellules individuelles. Les fonctions de transition sont écrites comme des fonctions de distances et représentent les forces d'attraction et répulsion entre paires de couvertures du sol. Il s'agit de simuler les activités urbaines en utilisant des règles d'interactions spatiales entre activités, avec des contraintes prédéfinies et modulables.

Cependant, ces versions étendues d'AC opèrent toujours un choix régulier de cellules carrées. Les relations de voisinage entre les objets spatiaux de forme et de tailles irrégulières sont encore un problème pour tout système spatial. Un AC standard devrait intégrer plus d'états, de voisinages infinis, et plus de contraintes avec des règles de transition complexes. Une technologie plus intégrée est requise pour modéliser la simulation urbaine: l'utilisation des agents intelligents est actuellement la meilleure approche pour modéliser le comportement dynamique de l'occupation du sol [Rodrigues et al, 1998].

LES AGENTS CELLULAIRES

Pour palier aux limites des automates cellulaires pour la simulation urbaine, de nombreux auteurs ont introduit la modélisation multi-agent, développée dans le cadre de l'intelligence artificielle distribuée, dans les AC, ce qui conduit aux **agents cellulaires**. Les systèmes multi-agents sont en effet très prometteurs pour modéliser les dynamiques spatiales.

Un grand nombre de travaux sur la simulation urbaine ont intégré les agents cellulaires : [Arentze et al, 2006], [Batty, 2005], [Batty et Jiang, 1999], [Benenson et Thorrens, 2004], [Caneparo et al, 2006], [Devisch et al, 2006], [Ma et al, 2006], [Rodrigues et al, 1998], [Vanbergue et Drogoul, 2002], [Waddell et Ulfarsson, 2004], [Zimmermann, 2006].

La définition la plus générale d'un agent est : composant logiciel orienté qui a la capacité d'agir intelligemment, indépendamment ou collectivement [Rodrigues, et al, 1998].

Dans [Hammam et al, 2003] et [Hammam et al, 2007], les auteurs démontrent les limites de l'utilisation des systèmes de simulation agent basés sur les modèles cellulaires.

En effet les limites rencontrées sont les mêmes que celles des AC. La modélisation des objets constituant la ville et de leurs interactions reste limitée par l'utilisation de la grille.

LES AGENTS VECTEUR

Selon [Hammam et al, 2003] et [Hammam et al, 2007], tout comme il semble que les agents soient plus flexibles que les automates cellulaires, il paraît également évident que les **agents basés vecteur** sont plus appropriés que les agents cellulaires pour modéliser la ville.

Le concept d'agent spatial a été introduit comme spécialisation du concept d'agent qui peut raisonner au-delà des représentations spatiales, et peut comprendre l'espace en tant que phénomènes physiques ou non physiques [Rodrigues et al, 1998]. Appliqué aux modèles spatiaux, les agents deviennent des entités évoluant dans l'espace et le temps, dans un environnement composé de tous les éléments passifs de l'espace [Gimblett, 2002].

La recherche sur les SIG et les agents spatiaux a suscité une grande attention ces dernières années [Rodrigues et al, 1997], [Ferrand, 2000], [Jiang et Gimblett, 2002], [Gimblett, 2002], [Lamy et al, 1999], [Duchêne et Regnaud, 2002]. La majeure partie de cette recherche s'est concentrée sur l'approche basée agent dans les SIG basés sur les AC pour la simulation spatiale et les systèmes interactifs d'aide à la décision.

Il n'existe encore que peu d'approches fondées sur la modélisation multi-agent basée vecteur. Les travaux les plus marquants dans le domaine des SIG concernant l'utilisation des systèmes multi-agent sur les objets géographiques modélisés en vecteur sont ceux de l'institut géographique national français dans le cadre des processus d'automatisation de la généralisation cartographique [Lamy et al, 1999], [Ruas, 2000], [Duchêne et al, 2001], [Duchêne et Regnaud, 2002].

Ces chercheurs ont mis au point un modèle de généralisation multi-agent qui intègre une stratégie à la fois locale et globale. Chaque agent micro (route, bâtiment, etc.) tente de généraliser au mieux sa géométrie (par des opérations de simplification, caricature, typification, etc.) en fonction des contraintes cartographiques à satisfaire (lisibilité, distance minimum de séparation, etc.). Puis chaque agent meso (îlot urbain, etc.) fait de même. Si aucune solution acceptable n'est trouvée, il est demandé aux agents micro de trouver une autre solution pour eux-mêmes. Et ainsi de suite jusqu'à trouver la solution la plus optimale pour tous les agents en fonction de toutes les contraintes de cartographie à satisfaire, du micro au macro.

L'usage du multi agent vecteur est un retour à une façon de modéliser naturelle, puisqu'il requiert simplement une description des objets et des processus [Ferrand, 2000].

Le système peut être intégré avec n'importe quel type d'information tel que des règles ou des fonctions, et est entièrement ouvert, de sorte qu'il est possible d'ajouter des agents de n'importe quel type [Wooldridge, et al, 1995]. Cependant la condition la plus fondamentale de n'importe quel modèle spatial est de manipuler la dynamique et les relations entre objets spatiaux irréguliers. Un AC, nous l'avons vu, ne répond pas à cette condition, et rend également les agents cellulaires inadéquats pour notre problématique.

[Hammam et al, 2003] soulignent que les agents vecteur offrent une manière plus réaliste pour modéliser les formes et les processus géographiques du monde réel que les agents cellulaires et les automates cellulaires, par le fait de gérer chaque entité spatiale comme un agent plutôt que comme un ensemble de cellules discrètes. Chaque objet spatial peut avoir un nombre infini de voisins sans limitation de distance, alors que les fonctions de transitions dans les AC ne peuvent être appliquées que sur les cellules voisines immédiates. Ainsi dans leurs travaux sur la simulation de l'occupation du sol, chaque classe d'objet spatial peut posséder son propre ensemble de règles de transition et de relations de voisinage qui peuvent être définies de multiples manières tel que dans le monde réel.

4 Le projet

POSITIONNEMENT ET CHOIX

Comme le démontre l'état de l'art, aucune approche à ce jour ne répond aux objectifs visés. Nous avons donc opté pour la mise en place d'une approche spécifique à la problématique de la simulation de la morphogenèse des métropoles contemporaines.

Suite à une revue la plus exhaustive possible de la littérature (dont la synthèse était présentée au chapitre précédent), nous avons démontré que les systèmes multi-agents basés vecteur répondent au mieux à nos objectifs de modélisation et de simulation de la métropole. C'est pourquoi nous avons opté pour l'approche suivante :

Multi-Agent, Vecteur, Multi-échelle

METHODOLOGIE MULTI-AGENT

Nous avons choisi la méthodologie **Multi-Agent** car c'est un outil particulièrement approprié à la simulation de phénomènes complexes. On utilise les systèmes multi-agents pour simuler des interactions existants entre agents autonomes. On cherche à déterminer l'évolution du système afin de prévoir l'organisation qui en résulte. Par exemple, en sociologie, on peut paramétrer les différents agents composant une communauté. En ajoutant des contraintes, on peut essayer de comprendre quelle sera la composante la plus efficace pour parvenir à un résultat attendu (construction d'un pont par exemple). Ce qui importe, c'est le comportement d'ensemble et non pas le comportement individuel. Des applications existent en physique des particules (agent = une particule élémentaire), en chimie (agent = une molécule), en biologie cellulaire (agent = une cellule), en éthologie (agent = un animal), en sociologie et en ethnologie (agent = un être humain). L'autonomie permet ici de simuler le comportement exact d'une entité (source : http://fr.wikipedia.org/wiki/Syst%C3%A8me_multi-agents). Dans notre cas, l'agent = un bâtiment, plus précisément une fonction de bâtiment, comme nous le verrons plus tard (villa, école, boutique, église, etc.).

On peut qualifier un agent au sens de l'intelligence artificielle d'objet intelligent: chaque agent a un but et peut interagir avec son environnement. L'intérêt d'un système multi-agents est d'obtenir, avec des comportements individuels simples, un comportement collectif émergent complexe auquel nous n'aurions peut-être pas pensé.

Un système multi-agents (SMA) est composé de plusieurs agents capables de s'organiser afin de réaliser un but commun. Selon J. Ferber « on appelle agent intelligent une entité réelle ou abstraite qui

est capable d'agir sur elle-même et sur son environnement, qui dispose d'une représentation partielle de cet environnement, qui, dans un univers multi-agent, peut communiquer avec d'autres agents et dont le comportement est la conséquence de ses observations, de sa connaissance et des interactions avec les autres agents. » Les SMA sont utilisés pour modéliser les phénomènes complexes [Wooldridge et al,1995] et permettent généralement de répondre à une question du type : comment un ensemble de comportements individuels engendre-t-il des règles de comportement globaux ? L'intérêt de la simulation multi-agents réside dans le fait qu'en définissant des règles simples, on peut aboutir à l'émergence de structures d'organisation parfois inattendues mais qui reflètent la réalité de l'observation.

Les SMA nous semblent appropriés pour modéliser la ville. Selon l'hypothèse posée, la ville est considérée comme un organisme vivant qui s'auto-organise selon des règles et donc par extension de manière « intelligente ». En simulant des interactions entre agents autonomes, nous cherchons à déterminer l'évolution du système afin de prévoir l'organisation qui en résulte.

Chaque agent (école, commerce, usine, villa, rivière, quartier, commune, etc.) a la capacité d'agir / réagir en fonction de son but. Par exemple la villa veut avoir une vue dégagée, être près d'une école, loin d'une nuisance telle qu'une usine, dans un quartier qui corresponde à son identité, etc. Ainsi dès qu'une usine s'installe près d'une zone villa, les degrés de satisfaction du quartier chutent fortement et engendrent une forte probabilité de disparition des villas au profit de nouvelles usines.

MODELISATION GEOGRAPHIQUE VECTEUR

Nous parlerons d'agents basés **vecteur** car dans notre système, un agent est un objet géographique qui possède une géométrie vecteur et des propriétés enrichies qui nous permettront de porter les lois de morphogenèse.

La modélisation SIG 3D vecteur a pour objectif d'offrir l'abstraction du monde réel qui permettra une représentation sensible de la métropole et de ses lois de morphogenèse nécessaire à sa simulation, dans la droite ligne de ce qu'écrivent [Berger et Nouhaud, 2004] en page 185 : « La géométrisation n'est pas un habillage approximatif à des fins didactiques mais une étape de la mathématisation, l'achèvement du modèle. Si l'on traduit les formes d'espace ainsi obtenues de la représentation mathématique à une représentation sensible, la topologie pure des objets produits par le modèle, reconstruite selon la physique du milieu analysé, offre la genèse auto-organisée de n'importe quel site donné et le dispose aux hypothèses de programmes et de projets. Le modèle offre ainsi un objet abstrait et un objet sensible, permettant à l'opérateur réflexion, programmation, projection et spéculation inverses et croisées à chaque étape. »

MODÉLISATION MULTI-ÉCHELLE

Enfin l'approche **multi-échelle** est indispensable non seulement pour des questions de représentation, mais également pour introduire la notion hiérarchique de gouvernance. Comme évoqué précédemment, la métropole d'aujourd'hui est de plus en plus auto-organisée. Cependant il reste une part de gouvernance sous forme de planification encore quelque peu suivie. Et si nous voulons un jour parler de stratégie urbaine, il nous faut comprendre comment des groupes d'habitats par exemple ou

des sous-système du système complexe qu'elle constitue aujourd'hui peuvent réagir à l'introduction d'un grand programme architectural.

CHANTIERS DE RECHERCHE

L'approche proposée étant complexe et faisant appel aux compétences de plusieurs disciplines, nous avons décomposé le projet en 4 grands chantiers, eux-mêmes décomposés en problématiques abordées, décrites sous forme de tâches. Le schéma ci-après propose une vue synthétique de l'articulation de ces problématiques dans chaque chantier, en les positionnant dans ou aux frontières des disciplines concernées.

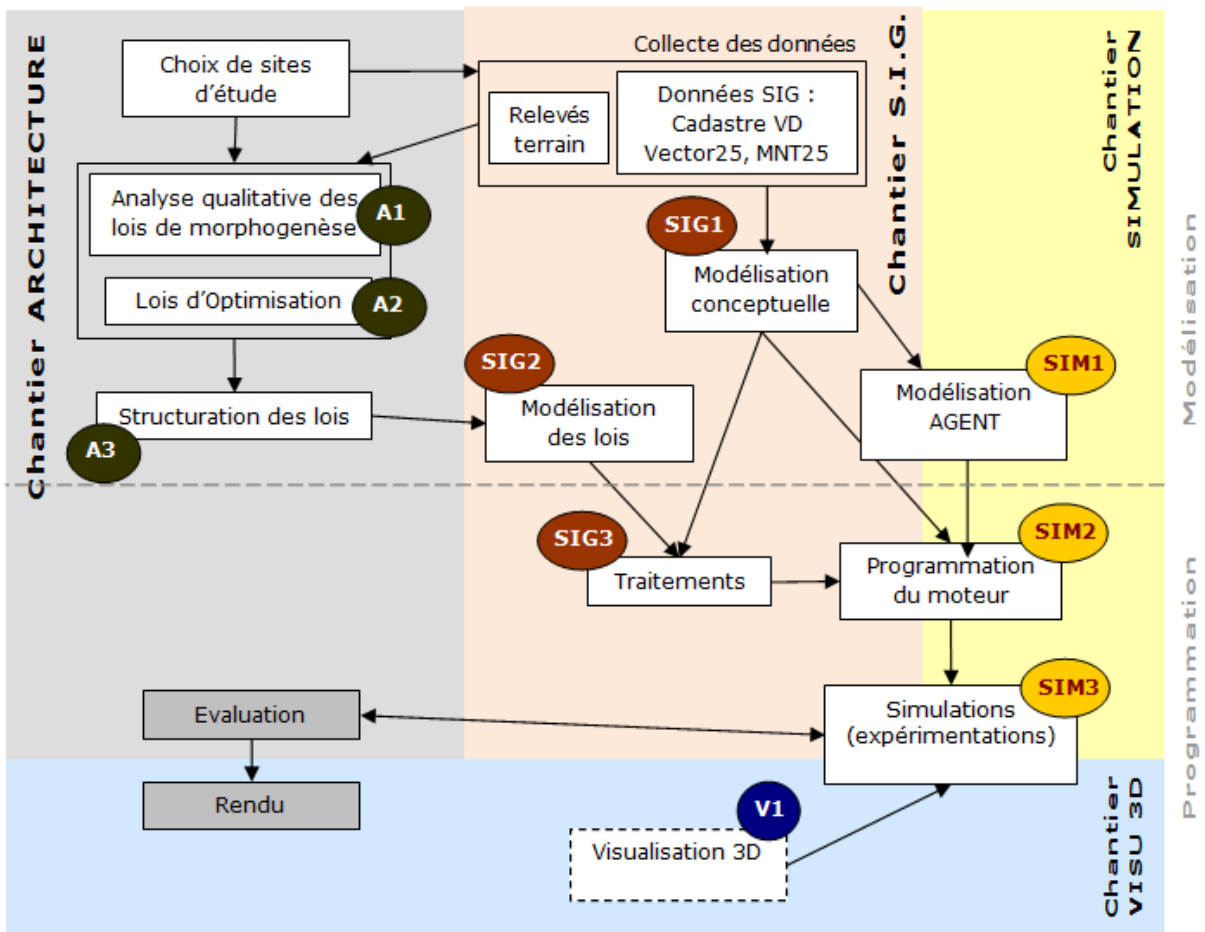


Figure 3 : Schéma synthétique des chantiers du projet

Les prochaines sections de ce chapitre introduisent ces grands chantiers, alors que les prochains chapitres aborderont en détail les méthodes mises en œuvre pour attaquer ces problématiques de recherche.

CHANTIER LOIS (ARCHITECTURE)

Ce premier chantier concerne principalement les connaissances en architecture et urbanisme. L'objectif est ici d'explorer les lois dynamiques qui régissent la morphogenèse de la métropole (formation des bâtiments et programmes, conservation, disparition, changement de fonction, désaffectation, stabilité / instabilité, continuité / discontinuité, etc.) et leur variation dans le temps, dans le but de la comprendre, de la simuler et de la visualiser, pour en évaluer la qualité, et faciliter l'aide à la décision en permettant au décideur d'observer et de valider ses hypothèses.

Tâche A1

Afin de parvenir à énoncer ces lois, notre première tâche (tâche A1 sur le schéma en figure 3) a consisté en une analyse de l'existant. Nous avons envisagé deux approches complémentaires :

- un travail minutieux d'observation de l'existant. Les connaissances découvertes à partir de ce travail d'**analyse qualitative**, combinées avec les connaissances théoriques actuelles des architectes sur la morphogenèse, doivent alors être structurées pour la simulation sous la forme d'évènements et de règles avec des valeurs de probabilité d'apparition².
- la découverte des connaissances architecturales sur la morphogenèse par **analyse quantitative** des données numérisées. Cette analyse pourrait faire l'objet de travaux de recherche basés sur les techniques d'exploration de données spatiales (ou *Spatial Data Mining*, terme anglais plus courant dans la littérature) qui font appel aux outils d'analyse spatiale en SIG et d'apprentissage supervisé en Intelligence Artificielle. Cependant le domaine de l'apprentissage supervisé est encore peu formalisé.

Nous verrons dans la suite de ce document que l'analyse qualitative qui a été menée à bien a conduit à de premiers résultats prometteurs, alors qu'une analyse quantitative n'a pu être entamée faute de ressources à disposition, ainsi que de non disponibilité de données historiques numérisées sur l'existant.

Certains travaux en ont montré l'efficacité : [Han et al, 1997], [Plazanet et al, 1998], [Ester et al, 1999], [Kriegel et al, 2004]. Cependant la mise en place de cette approche nécessiterait une phase de recherche approfondie sur la problématique spécifique afin d'établir une méthodologie d'exploration des lois de morphogenèse. Cette étude pourrait faire l'objet d'un travail de doctorat en SIG. De plus, ce type d'analyse nécessite de posséder suffisamment de données historiques, soit plusieurs versions de base de données sur un même lieu, à différentes dates, et numérisées au format vecteur.

Tâche A2

² Une règle aura un format comme suit : SI condition ALORS action (probabilité). Par exemple, si l'âge d'un bâtiment atteint la limite de stabilité pour son type, alors il disparaît avec une probabilité de 0.9. En d'autres termes, une villa de plus de 30 ans a 90% de chances d'être supprimé. Un évènement est une action avec une valeur de probabilité. Par exemple, une autoroute peut devenir route à 4 voies avec une probabilité de 0.2.

L'énoncé des lois de morphogenèse de la métropole doit également être complété par une analyse morphodynamique des éléments constituant la métropole. C'est l'objet de la tâche A2, qui se poursuit dans le cadre d'un doctorat en architecture (doctorat de Jong-Jin Park).

Partant de l'hypothèse que l'état de la ville contemporaine peut être rajusté à l'aide de représentations dynamiques qui s'adaptent à sa morphogenèse, l'objectif de la thèse est de mettre en évidence les invariants de symétrie qui engendrent les formes optimales et singulières de la morphogenèse de la ville. Les lois explicitées au cours de ce travail pourront alors compléter le processus de simulation développé dans le cadre du projet.

Tâche A3

Enfin l'ensemble des lois énoncées doit être structuré dans le but d'être modélisées mathématiquement pour être introduites dans le moteur de simulation. C'est l'objet de la **tâche A3**. Ce travail a donné lieu à un rapport interne en cours de finalisation par Andrea Calenchini. L'ensemble des lois est résumé dans le prochain chapitre de ce document.

CHANTIER GEOMATIQUE (S.I.G.)

Ce chantier joue le rôle de fédérateur des différents chantiers, les traitements géomatiques étant nécessaires tout au long du processus.

La ville contemporaine, appréhendée comme un organisme vivant, est modélisée au sein d'un système d'information géographique (S.I.G.) cognitif avec ses états physiques en constante évolution.

Ainsi les différentes tâches dévolues à ce chantier sont :

- ✓ **Tâche SIG1** : Il s'agit de collecter les données spatiales et de concevoir le schéma conceptuel des données spatiales orienté objet enrichi par les connaissances nécessaires pour supporter les lois de morphogenèse et le développement du moteur de simulation.

C'est le cas notamment pour la notion de fonctions de bâtiment (aspect programmatique), que nous introduirons au prochain chapitre, et qui joue un rôle important dans la morphogenèse. La classification des désignations cadastrales du canton n'est pas suffisamment précise pour les besoins du projet. Dans ce cas, il est nécessaire de procéder à des **relevés terrain** des données existantes pour compléter la base de données.

Les schémas des bases de données dont nous disposons actuellement (cadastre vaudois, vector25 de Swisstopo, etc.) ne sont pas suffisants et ne sont pas directement adaptés à la modélisation dont nous avons besoin. Des compléments de géométrisation, l'ajout de nouvelles données attributaires, et de nouvelles structures spatiales susceptibles de porter les connaissances des architectes nécessaires pour modéliser les lois de morphogenèse à introduire dans le moteur de simulation sont nécessaires. Nous verrons plus loin dans ce rapport que c'est le cas des groupes d'habitats et des systèmes urbains qui jouent un rôle prépondérant dans la simulation agent.

- ✓ **Tâche SIG2** : les lois qui régissent la morphogenèse doivent être modélisées afin d'être introduites dans le moteur de simulation. Nous verrons que nous avons modélisé chaque loi sous la forme d'un degré de satisfaction (en pourcentage), permettant ainsi d'obtenir la

satisfaction global de chaque agent par une moyenne pondérée. C'est une première approche pour ce projet. Il conviendra de valider par les expériences de simulation sur divers sites.

- ✓ **Tâche SIG3** : Une fois la phase de conception du schéma de la base de données enrichi terminée, les données doivent être implantées dans le système par le biais de traitements géomatiques que nous avons spécifiquement développé pour nos besoins. En particulier, les nouvelles structures spatiales abstraites telles que la notion de groupe d'habitats ou de système urbain s'avèrent complexes à détecter. Nous avons établi une première approche de détection. Cependant cet aspect devrait faire l'objet d'un doctorat en géomatique afin de mettre en place une méthodologie formelle permettant d'obtenir de meilleurs résultats.

CHANTIER SIMULATION

Nous avons opté pour la simulation Agent car les systèmes multi-agents (SMA) sont de performants outils de modélisation, qui permettent de faire émerger des phénomènes complexes à partir de règles de comportement individuel, et qui possèdent ainsi un grand pouvoir explicatif.

Les SMA offrent des qualités essentielles en réponse à nos objectifs :

- Ils fournissent une description naturelle du système, permettant une modélisation aisée des règles d'interactions entre agents
- Ils sont flexibles, en permettant l'intégration de nouvelles règles au modèle, et l'observation des résultats sur l'évolution de la simulation
- Ils peuvent être le théâtre de phénomènes émergents, phénomènes que nous souhaitons observer dans la simulation urbaine, pour pouvoir ainsi mieux comprendre l'évolution de la ville.

Tâche SIM1 :

Ce chantier comprend un travail important d'analyse conceptuelle qui a pour but de concevoir le **modèle Agent** sur la base du schéma de base de données enrichi lors du chantier SIG. Il s'agit de définir les composants du système : l'identité des agents et leurs comportements. Puis la phase de conception de l'architecture du système permet d'établir le diagramme des interactions entre agents, et les schémas détaillant les scénarios de chacune de ces interactions.

Ce travail fait actuellement l'objet d'un doctorat exploratoire en SIG.

Tâche SIM2 :

A partir de cette première tâche de modélisation conceptuelle, vient la phase d'implémentation proprement dite du moteur de simulation Agent.

Il existe de nombreuses plateformes de développement de SMA, dont certaines sont freewares. Nous citerons notamment Swarm (<http://www.swarm.org/>), AgentBuilder (<http://www.agentbuilder.com/>), Jade (<http://sharon.cselt.it/projects/jade/>) ou encore MadKit (<http://www.madkit.org/>).

Nous verrons que nous avons opté pour une solution ouverte avec la plateforme de développement SIG Java *OpenSource* GeOxygene qui nous permet d'envisager une solution pleinement intégrée telle

que sur la figure 4, pour laquelle les bibliothèques Java SIG et de simulation sont couplées au sein du même système. Ceci permettra à terme d'envisager une visualisation dynamique 3D complète.

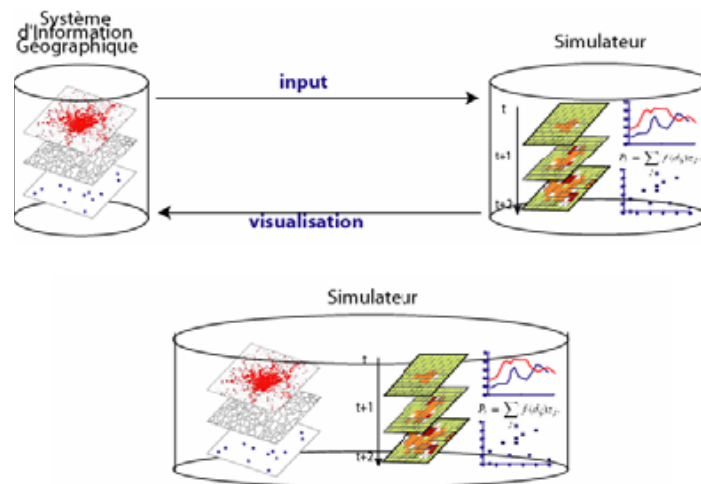


Figure 4 : Du couplage (schéma du haut) à l'intégration (schéma du bas) [Sanders, 2005]

Tâche SIM3 :

Enfin une phase d'**expérimentations** et d'analyses statistiques est nécessaire, puisque la simulation repose sur un modèle que nous avons établi sur la base de l'observation du réel et de nos connaissances actuelles en architecture et urbanisme. *La simulation numérique ne doit évidemment pas être confondue avec le réel. Ce n'est pas parce que l'ordinateur dit que cela va se passer ainsi que cela se comporte effectivement comme tel dans la réalité (par exemple, les simulations numériques des prévisions météorologiques). La simulation numérique n'est qu'une représentation du réel assise sur le modèle théorique sous-jacent. Si le modèle théorique ainsi informatisé est erroné, les résultats calculés sont alors faux et peuvent amener à des prises de décision elles-mêmes erronées. La meilleure façon de résumer cette critique épistémologique est: "la carte n'est pas le territoire !" Ainsi, la simulation numérique ne doit pas être utilisée sans prise de recul scientifique, ni prudence professionnelle. L'analyse critique des résultats, la calibration et la vérification de la validité des modèles théoriques utilisés, la confrontation des résultats prédits à l'expérience ... sont autant de réflexes d'ingénieur à avoir et qui font alors partie même de l'éthique du professionnel utilisateur.* (Extrait de l'article sur la simulation de l'encyclopédie libre Wikipedia : http://fr.wikipedia.org/wiki/Simulation_informatique).

Cette phase primordiale d'expérimentations permettra l'étude et l'analyse critique des résultats des simulations de manière à calibrer et de valider le modèle proposé. Là encore, il conviendra d'acquérir les données terrain nécessaires. Cette étude géostatistique devra également faire l'objet d'un doctorat, dans la mesure où nous n'avons pas pu l'aborder dans le cadre du projet faute de ressources à disposition.

CHANTIER VISUALISATION 3D

Nous avons initialement prévu une visualisation dynamique 3D des résultats de simulation, du niveau local (le bâtiment) au niveau global (la métropole) en passant par le niveau intermédiaire du quartier (le groupe d'habitats et le système urbain). Or cette tâche (**tâche V1**) n'a pas pu faire l'objet d'une étude approfondie faute de ressources.

Comme évoqué dans la section précédente, la solution optimale envisagée consiste en un couplage total du moteur de simulation au sein du SIG. Ceci permettrait une visualisation 3D entièrement dynamique : la vue de la métropole est rafraîchie après chaque opération. On peut ainsi imaginer voir « en temps réel » la morphogenèse. L'autre avantage serait également de pouvoir changer à tout moment de point de vue et d'échelle d'affichage.

Pour obtenir un rendu réaliste et acceptable en termes de temps d'affichage, la difficulté réside en particulier dans le choix et la mise au point de l'outil de visualisation 3D, et dans les performances de calcul du prototype.

Pour l'heure, la solution implémentée pour le prototype est entièrement différée : nous créons une animation reconstituée à partir de la série d'images obtenues à chaque étape du processus de simulation. Dans le courant du dernier semestre 2008, un travail conjoint entre les doctorats de Vitor Silva et de Claudio Carneiro (doctorant au laboratoire LaSIG) devra permettre de mettre en place et de tester une solution de visualisation 3D en Java.

Une autre réflexion à mener concerne les possibilités de représentations multi-échelle. Comme évoqué ci-dessus, changer à tout moment de point de vue et d'échelle d'affichage implique la possibilité d'avoir différents niveaux de représentation de la métropole : du bâtiment aux surfaces représentant l'agrégation de bâtiments ou de quartiers, voire à l'échelle de l'arc lémanique afin de visualiser l'entier de la métropole.

A l'échelle globale, pour offrir une vue lisible, il sera intéressant de ne montrer par exemple que les points correspondants aux centres urbains, les grands programmes architecturaux et les surfaces correspondants aux quartiers avec des classifications thématiques, afin de donner à voir l'influence des grands programmes sur les quartiers.

Ce dernier aspect de la recherche n'a pu être abordé dans le cadre du projet et pourrait faire l'objet d'un autre sujet de doctorat en infographie, SIG, architecture.

ZONE D'ÉTUDE

Concernant le choix de sites d'étude, nous avons établi une zone de travail dans l'ouest Lausannois, cette zone étant susceptible de subir de nombreux aménagements dans un avenir relativement proche. Elle s'étend du lac au sud à Renens au nord (encadré de couleur orange sur l'orthophoto en figure 5 ci-dessous).

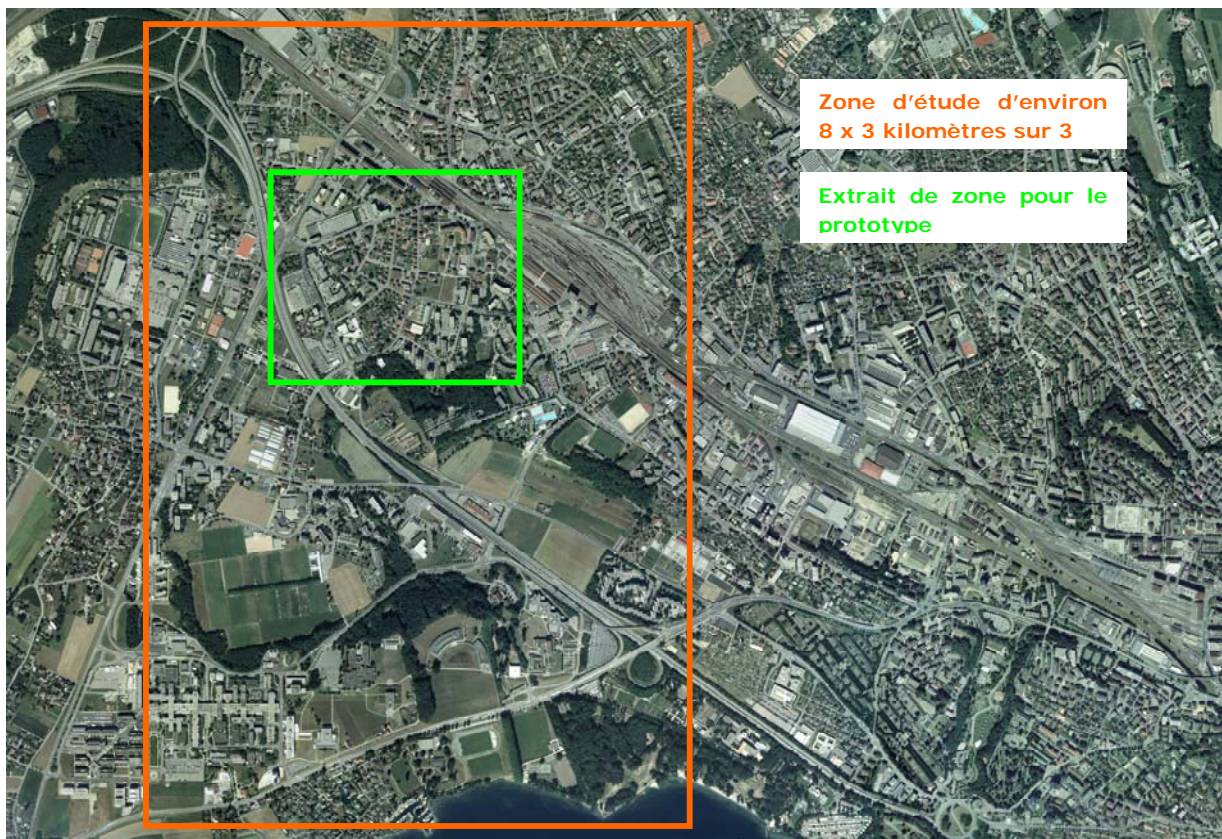


Figure 5 : Extrait d'orthophoto numérique couleur de la zone d'étude (source SwissTopo)

Nous avons restreint cette zone autour de Chavannes près Renens (encadré de couleur verte sur l'orthophoto en figure 4) pour les besoins du prototype et pour des questions de disponibilité des données terrain.

RESSOURCES

L'équipe de projet est composée de :

- Pr. Patrick Berger, directeur du laboratoire UTA
- Dr Corinne Plazanet, chef de projet, 100%
- Philippe Bonhôte, collaborateur scientifique, 5%
- Dr Bassel Farra, collaborateur scientifique, 5%
- Andrea Calenchini, assistant, 40%, de septembre à décembre 2006
- Jong Jin Park, doctorant en architecture, 100%
- Vitor Silva, doctorant en géomatique, 100%
- Janka Rahm, graphiste, 5%

Parmi les 6 sujets de doctorat envisagés lors de la première année, deux sujets ont finalement été pourvus :

Disciplines	Sujet	Doctorant
Architecture, SIG	Découverte d'invariants de configurations optimales (symétrie) et introduction dans le moteur de simulation	Jong-Jin Park
SIG, IA, Maths	Conception et implémentation du moteur agent	Vitor Silva

COLLABORATIONS

LABORATOIRE LASIG, FACULTÉ ENAC, EPFL

La collaboration s'est poursuivie avec le laboratoire LaSIG de l'EPFL dirigé par le Pr. François Golay, durant les 3 années du projet. Le laboratoire LaSIG a concrètement assuré différents travaux d'importance dans le cadre du projet tels que :

- ✓ La fourniture des données géographiques et des logiciels SIG (Manifold notamment pour la préparation de la base de données), ainsi que l'expertise sur leur utilisation
- ✓ La mise en place d'une méthode d'exploitation des données LIDAR pour le calcul de visibilité depuis chaque bâtiment du modèle vers un élément symbolique tel que le lac, ou encore le calcul de l'exposition solaire de chaque bâtiment. Ce travail a donné lieu à une publication conjointe avec Claudio Caneiro, doctorant dirigé par le pr. Golay, qui a personnellement développé la méthode : voir [Silva et al, 2008]
- ✓ La mise en place de méthodes de calcul d'indicateurs 3D tels que la hauteur et le volume précis des bâtiments, ou encore la classification des toitures. Cette recherche a été réalisée dans le cadre d'un travail de master, également en partenariat avec le doctorant Claudio Caneiro. Voir [Zwolak, 2008]
- ✓ Enfin il est prévu pour l'hiver de démarrer le chantier de visualisation 3D en partenariat avec Claudio Caneiro, dans le but de proposer des résultats de simulation dynamiques réalistes sur la base d'un modèle 3D enrichi de la ville.

LABORATOIRE COGIT, IGN-FRANCE

Nous avons établi un partenariat avec le laboratoire COGIT de l'IGN-France (Institut Géographique National). Ce laboratoire, dirigé par le Dr Anne Ruas, présente les avantages d'avoir une expérience unique dans le développement de système Multi-Agent vecteur pour la généralisation cartographique, d'avoir développé la plateforme de développement SIG *OpenSource* appelée GeOxygene que nous avons choisi dès la fin 2006. Nous avons eu ainsi une expertise solide à la fois dans le développement SIG et multi-agents vecteur, et une assistance téléphonique sur la plateforme depuis cette date.

AUTRES PARTENARIATS

Nous avons également abordé dans les précédents rapports la nécessité d'établir une collaboration avec des mathématiciens ou des informaticiens spécialisés en intelligence artificielle, afin de nous assurer d'une expertise voire d'un support dans le développement de la plateforme de simulation Multi-Agent.

Différents contacts ont été pris, avec la faculté IC, SB ou encore ENAC de l'école, notamment avec les pr. Martinolli ou Faltings, ou encore avec le pr. Bierlaire avec lesquels nous n'avons malheureusement pas pu aboutir à un partenariat concret, faute de moyens.

5 Les lois de morphogénèse

L'énoncé des lois de morphogénèse est réalisé sur la base des connaissances théoriques des architectes, sur l'observation des sites d'étude, ainsi que suite aux travaux des étudiants dans l'atelier du professeur Berger sur le découverte guidée de lois de morphogénèse.

Il s'agit d'énoncer les lois de morphogénèse urbaine qui 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 les cultures.

A partir d'une analyse qualitative, nous avons pu distinguer 5 grands types de lois dans le système, qui se fondent sur l'hypothèse d'une réaction à cinq critères :

- ✓ 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 et 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

Nous ne prétendons pas à l'exhaustivité de cet énoncé. Une analyse quantitative par les méthodes d'exploration de données spatiales existantes d'une part, et les expérimentations poussées de simulation sur différentes zones permettront d'affiner les lois énoncées ici.

CROISSANCE NATURELLE ET DENSITE

LOI D'EXPANSION

La première hypothèse envisagée est de dire que la ville croît naturellement (loi d'expansion). Cela se traduit principalement par une augmentation dans le temps du nombre de logements à bâtir.

Ainsi par exemple, il est prévu de construire 30'000 logements durant les 15 prochaines années dans la région Lausannoise. Dans le cadre du prototype développé, nous nous sommes basés sur ce fait pour en déduire grossièrement sur la commune de Chavannes près Renens, la construction de 300 logements par année.

La proportion de bâtiments à bâtir est actuellement en règle générale dans notre région de :

- ✓ 1% de villas

- ✓ 79% d'habitations forte densité
- ✓ 20% de bâtiments de bureaux

La quantité d'autres services à bâtir : écoles, lieux de culte, commerces, industries, etc. est fonction du nombre de logements à bâtir.

LOI D'ÉCONOMIE D'ESPACE (DENSITÉ)

La deuxième hypothèse de l'architecte indique que la ville ne s'étend plus. Or la ville croissant naturellement, ceci implique que la densité urbaine augmente. Les images de la métropole lausannoise en 1974 et 2001 ci-dessous illustrent ce point : on observe que la limite globale n'a pas changé alors que dans cette limite, le paysage urbain s'est très fortement densifié.

De plus, aujourd'hui la ville se construit sur elle-même. Ainsi il a peu de nouvelles constructions, cependant les constructions existantes changent fréquemment de fonction.

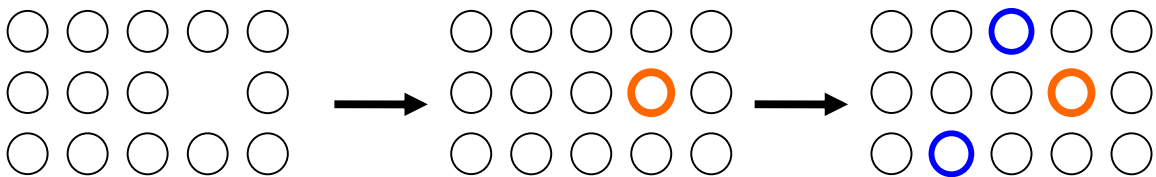


Figure 6 : Illustration schématique de la loi d'économie d'espace

Ainsi s'il y a de la place disponible (sur une parcelle), il y a une forte probabilité pour que cela y entraîne la formation d'un nouvel objet rapidement : « J'en mets un dès que je peux ». Ceci en respectant les contraintes d'urbanisme et d'architecture : la fonction du nouvel objet doit correspondre au type de zone d'affectation et des objets voisins, ainsi que sa taille à la place disponible.



Figure 7 : La métropole lausannoise en 1974

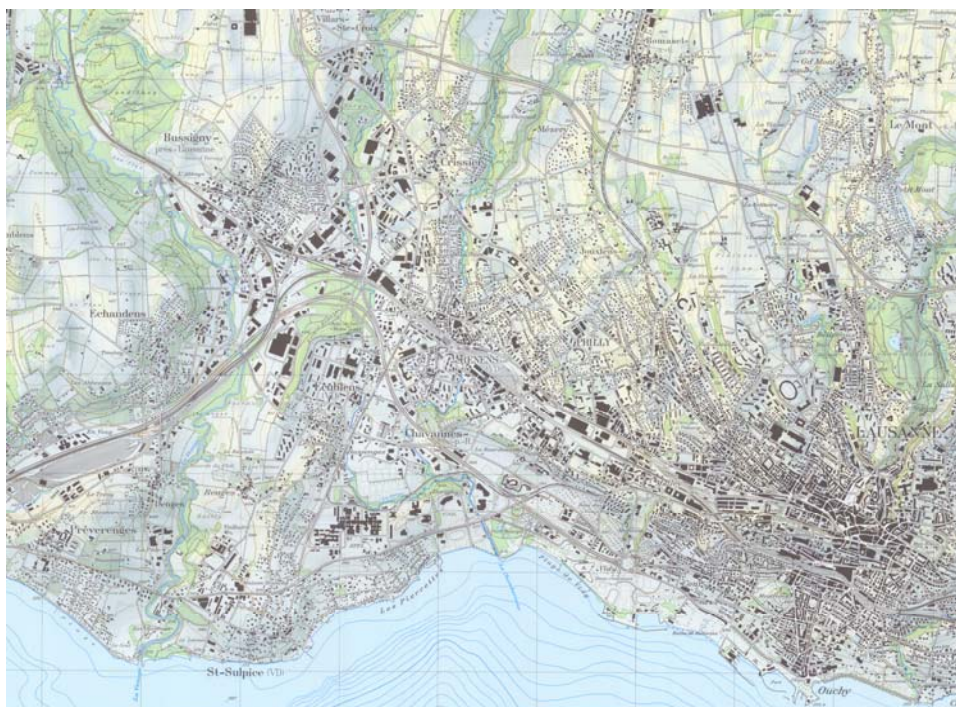


Figure 8 : La métropole lausannoise en 2001 (Extraits de la carte nationale au 1:25'000 – Office fédéral de topographie)

DÉCROISSANCE DE LA DENSITÉ PARCELLAIRE

Plus on est loin du centre urbain, plus on consomme d'espace, et plus la densité diminue. Ainsi la surface des parcelles utilisées pour le même type de bâtiments décroît en fonction de l'augmentation de la distance au centre urbain.

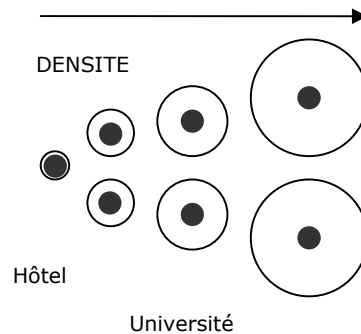


Figure 9 : Densité parcellaire fonction de l'éloignement du centre

INFLUENCE FONCTIONNELLE

FONCTIONS

La fonction d'un bâtiment est le rôle, l'utilité qu'il a dans la ville : habitation, commerce, lieu d'enseignement, lieu de travail, etc.

Nous avons établi la liste des fonctions qui correspond au niveau de détail (inversement au niveau d'agrégation) que nous traitons dans le cadre du projet. Cette liste est détaillée au chapitre suivant.

INFLUENCE FONCTIONNELLE

Ces fonctions jouent un rôle primordial dans la localisation des bâtiments et des programmes. Ceux-ci sont toujours associés à une ressource : la topographie, la présence de verdure, de service (école, commerce, etc.) ou à une nuisance : le bruit de l'autoroute, la voie ferrée, un bâtiment industriel...

De nombreux auteurs ont en effet intégré ce critère dans leur système de simulation : [Engelen et al, 1997], [Benenson et Thorrens, 2004], [Sanders, 2005], [Pumain et al, 1989], [Caneparo et al, 2006], [Arentze et al, 2006], etc.

La loi peut être synthétisée comme suit. La localisation d'un objet est préférable si il se trouve :

- ✓ Proche d'un maximum de **services** liés à la vie quotidienne (commerces, écoles, réseaux du sous-sol, etc.), aux transports (accès routier, gare, etc.) et aux loisirs (cinémas, théâtre, culte, parc, piscine, centre sportif, etc.)

- ✓ Éloigné d'un maximum de **nuisances** atmosphériques, sonores, esthétiques, etc. (zone industrielle, usine, voie ferrée, route, etc.)
- ✓ Nous distinguons donc 2 types d'influence :
- ✓ Influence positive (ou force d'attraction), liée à des services (ou ressources),
- ✓ Influence négative (ou force de répulsion), liée à des nuisances.

Ainsi l'arrivée d'autoroutes entraîne la formation de centres commerciaux ou de zones villa. La disponibilité de terrains plats entraîne l'apparition de gares de triage. La formation d'école fait suite à la formation de zones résidentielles.

Dynamique

Notons cependant que ces règles sont valables aujourd'hui et dans nos régions. Elles sont donc susceptibles d'évoluer dans le temps. Par exemple aujourd'hui un occidental recherche le plus fréquemment le calme, la vue sur la nature ou sur un beau monument historique. Mais cela n'a pas toujours été le cas.

Au XIX^{ème} siècle, l'apparition des grands hôtels était liée à l'arrivée du train. Aujourd'hui, le train est une nuisance sonore.

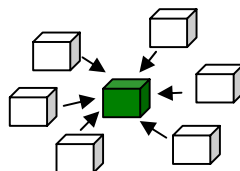
De plus certains objets peuvent être à la fois ressource et nuisance. Par exemple une autoroute peut être une nuisance pour les zones résidentielles, alors qu'une entrée d'autoroute a un fort attrait pour les commerces.

Enfin l'influence peut également dépendre de la zone urbaine elle-même : un atelier d'artisanat est une nuisance pour une zone villa, alors qu'il est acceptable en ville. Ce point étant complexe à modéliser, il ne sera pas pris en compte dans un premier temps.

Une liste complète des fonctions, suivie de la table des influences, est présentée au chapitre suivant. Nous verrons que ces éléments entreront également dans la dynamique du système.

INFLUENCE POSITIVE : ATTRACTION

L'attraction (du latin *atrahere* : "tirer à soi") est la mesure de la force d'attraction d'un **service** (extrait de http://hypergeo.free.fr/article.php3?id_article=55).

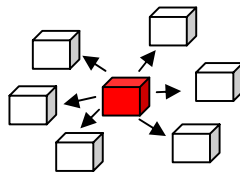


Voici quelques exemples afin d'illustrer le principe, sachant que la table des influences issues de la modélisation présentera une liste plus exhaustive :

- ✓ Pour la création d'une boutique, la présence de commodités est indispensable (parking, stations de transports en commun, etc.), ainsi que des éléments attirant un flux de chalands : enseignes-phares (à condition que ce ne soit pas un concurrent direct, bureau de poste, distributeur de billets, etc.
- ✓ Pour un centre commercial, il est préférable d'être près d'une autoroute.
- ✓ Pour une gare de triage, sont privilégiés les terrains plats.

INFLUENCE NÉGATIVE : RÉPULSION

L'influence négative (ou répulsion) est la mesure de la force de répulsion d'un **nuisance** (i.e. ligne de chemin de fer, zone industrielle, autoroute sans mur antibruit, aéroport, etc.).



VOISINAGE

Les objets de même fonction, ou de fonction similaire, peuvent eux-mêmes être attirés les uns les autres. Quand un bâtiment se construit, d'autres de même fonctions viennent s'installer dans le voisinage. Un peu comme lorsque vous êtes seul à la plage, et que le prochain qui arrive se met inmanquablement près de vous...

C'est notamment une loi assez connue pour la recherche optimale de meilleure d'emplacement de commerces, pour laquelle il est recommandé de :

- ✓ Ne pas être isolé : présence proportionnée de concurrents (ni trop, ni trop peu).
- ✓ Ne pas être en rupture par rapport aux types d'offres commerciales environnantes, soit éviter de créer un magasin de vêtements ou de nouveautés dans une rue très marquée par les métiers de bouche tels que : primeurs, boucheries, charcuteries, poissonneries, ...

C'est ainsi que souvent en centre ville, on trouve le quartier des merceries, le quartier des antiquaires, etc.

C'est également le cas pour les zones pavillonnaires. Les villas se regroupent les unes à côté des autres.

POUVOIR SYMBOLIQUE

Tout objet du territoire : un programme architectural, un sommet, un grand centre, un lac, etc. peut avoir une influence plus ou moins importante sur son environnement selon sa localisation et sa fonction. Nous appellerons **pouvoir symbolique**, l'influence qu'exerce un objet sur son environnement, qu'elle soit programmatique, esthétique, etc...

Une maison locative ou une route a un pouvoir symbolique nul.

La campagne, les rivières ont un pouvoir symbolique moyen, alors que les monuments historiques ou religieux, les églises, les symboles de la nature comme les Alpes, certains lacs ont actuellement un fort pouvoir esthétique.

C'est le cas notamment de la cathédrale à Lausanne, du lac sur toute la riviéra vaudoise, du Cervin à Zermatt. L'EPFL a un fort pouvoir programmatique.

Dynamique

Là encore le pouvoir symbolique a une validité aujourd'hui et dans nos régions. Sa valeur peut également être susceptible d'évoluer dans le temps en fonction des modes et des cultures.

Ainsi certains objets peuvent n'avoir aucune influence pendant de nombreuses années avant d'« apparaître » comme des éléments influençant (exemple du Cervin à Zermatt). C'est ce que nous appellerons le phénomène d'**apparition**.

Dans l'histoire de la ville de Zermatt, les bâtiments se sont initialement formés le long de la rivière. Puis le Cervin est apparu comme un objet hautement important symboliquement. Les habitations ont alors commencé à être construites face au Cervin de manière à bénéficier de la vue, ainsi que de l'exposition au Sud.

De manière générale, nous pouvons considérer que les monuments historiques sont les seuls objets qui ont un fort pouvoir programmatique qui n'évolue pas dans le temps.

VUE

Un autre critère d'influence peut être la vue optimale sur des objets à fort pouvoir symbolique. Le principe est le même que celui du pouvoir symbolique. Cependant il y a une contrainte physique supplémentaire.

Un bâtiment peut être proche d'un objet à fort pouvoir symbolique, mais ne pas offrir de vue sur cet objet selon sa situation topographique ou liée à la hauteur des bâtiments voisins.

Inversement la vue joue un rôle négatif dans le cas d'une usine, d'une gare de triage, etc. Nous pensons que ceci peut être modélisé avec la notion d'influence négative.

Dynamique

Là encore cette loi varie dans le temps selon les modes et les tendances, et peut également dépendre des préférences de chacun. Bien évidemment ce critère évolue également en fonction des changements physiques qui interviennent sur l'environnement voisin.

L'EXPOSITION (ENSOLEILLEMENT)

Le bâtiment doit également jouir d'un ensoleillement maximal. Pour cela son orientation doit être optimale.

CONTRAINTES PHYSIQUES

Le terme de contrainte est à prendre ici au sens de règle obligatoire, donc inviolable. Ainsi nous définissons si dessous les lois d'architecture à prendre en compte dans la localisation de nouveaux bâtiments, telles que par exemple la loi de pente maximale de construction au-delà de laquelle il n'est plus possible d'implanter un bâtiment.

DISTANCE DE SÉPARATION MINIMUM

Il convient de prendre en compte le seuil de séparation minimum entre les bâtiments et les objets voisins. C'est une loi d'architecture simple qui indique que la distance de séparation δ est égale au minimum à la hauteur h du bâtiment à construire.

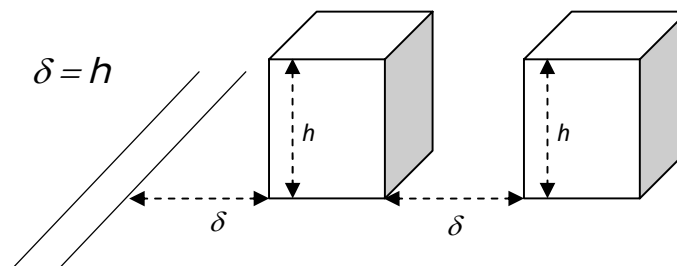


Figure 10 : Loi de séparation minimum $h=l$

Nous n'avons pas envisagé dans le cadre du projet la notion de bâtiments contigus. Il conviendra de l'ajouter dans une deuxième phase.

ADÉQUATION AUX PARCELLES ET À LA ZONE D’AFFECTATION

Les bâtiments doivent être construits au sein de la parcelle en respectant la distance minimum de séparation aux limites de la parcelle.

La fonction des bâtiments construits doit être adéquate à la dénomination légale de la zone d’affectation : usine sur une zone industrielle, bâtiment scolaire sur une zone d’utilité publique, villa sur une zone d’habitation faible densité ou sur une zone mixte, etc.

Nous ne prenons pas en compte ces contraintes dans le cadre du projet, sachant que ces règles subissent très fréquemment des modifications.

LA PENTE DU TERRAIN

La pente du terrain joue également un rôle dans la localisation d’un bâtiment. Nous modélisons le seuil au-delà duquel la construction n’est pas possible.

Ce seuil varie selon la valeur programmatique des bâtiments. Ainsi une villa de type chalet en montagne peut être construite dans une pente forte, alors que l’implantation d’un centre commercial n’est pas possible au-delà d’une pente de faible valeur.

LOI MORPHOLOGIQUES

Une hypothèse importante de l’architecte est de dire que la complexité des activités humaines peut être basée sur une géométrie naturelle ou sociale (figure anthropologique) qui crée par analogie une géométrie urbaine (figure architecturale).

Ainsi la croissance naturelle se ferait selon un principe de symétrie de formes anthropologiques, puisqu’il y a nécessité d’économie d’espace, d’énergie et de matière. Si une forme apparaît et qu’elle s’avère optimale, il y a de fortes probabilités qu’elle réapparaisse ailleurs à une autre résolution adaptée au nouveau contexte. C’est un processus d’optimisation « naturel ».

Ce thème fait l’objet d’un doctorat en architecture (par Jong-Jin Park). Les premiers résultats de ses travaux sont présentés brièvement ci-dessous. Pour de plus amples détails, il conviendra de consulter son rapport de thèse.

LES GROUPES D’HABITAT

L’observation des métropoles actuelles à une échelle intermédiaire (que l’on peut qualifier d’échelle des quartiers) donne *a priori* l’impression d’un univers chaotique. En réalité, on peut remarquer la présence de structures régulières et symétriques dans l’habitat qui reflètent une organisation spatiale basée sur des regroupements géométriques. Ceci nous a permis de mettre en évidence un fonctionnement de l’habitat sous la forme de regroupement des bâtiments.

Il est alors possible d'envisager la ville comme un ensemble d'individus (les bâtiments) qui se regroupent naturellement entre eux selon des critères de proximité et d'accès communs aux services (commerces, école, travail, etc.).

Ainsi nous définissons un groupe comme un ensemble de bâtiments construits ayant des caractéristiques communes : même programmation (de type logement), proximité et similitude de forme géométrique (invariant de forme géométrique).

En langage ensembliste, un **groupe d'habitat (GH)** est défini par :

$$GH = \{H_{n|n \geq 3}\},$$

H étant un bâtiment de type Habitat,

n étant le nombre d'individus du groupe.

Par répétition de l'invariant définissant chaque groupe, il est possible de les reconstruire par opération de symétrie : translation, rotation, etc.

Par l'observation minutieuse de l'existant sur notre zone d'étude puis sur différentes métropoles, nous nous sommes aperçus que ces regroupements peuvent en général être décomposés en figures élémentaires simples qui se réduisent aux formes géométriques de base : la ligne, le triangle ou le carré³. Ainsi nous émettons l'hypothèse que ces groupes d'habitat peuvent être décrits à partir d'un **invariant** de forme, lui-même défini à partir de 2, 3, ou 4 individus : « —, Δ, □ ».

L'observation de la forme d'habitats dans l'histoire de la ville nous a permis d'établir empiriquement 3 critères principaux de regroupement :

- ✓ le programme,
- ✓ la proximité,
- ✓ la similitude de forme géométrique.

Nous avons ainsi introduit la notion de groupe⁴ d'habitats qui forment des figures d'organisation élémentaires de l'espace urbain. De plus les formes de ces groupes sont elles-mêmes des **figures**

³ Ces formes d'organisation résultent d'un aspect anthropologique de l'espace. Cet aspect invariant dans l'histoire de l'homme est primordial selon l'architecte pour s'assurer de la qualité d'un lieu personnel ou collectif, pour l'établissement d'une identité propre et pour leur propre optimisation.

⁴ Un groupe est un « ensemble de personnes ou de choses ayant des caractéristiques communes », par www.cnrtl.fr. On estime que grouper est un phénomène dans l'histoire de l'être vivant. Dès les premières sociétés primitives, l'être humain aussi se met en ensemble dans les espaces à vivre afin de protéger, produire et partager de manière symbiotique. Ici, nous voyons que la ville est comme un organisme vivant constitué par les groupes d'individus construits afin de favoriser l'effet d'ensemble.

permanentes⁵ dans l'histoire de l'homme et peuvent être réduites à une classification de géométries simples : la **ligne**, le **triangle** et le **carré**, soit « —, Δ , \square ».

Ceci a pu être vérifié sur quelques communes de l'Ouest Lausannois. Les figures d'organisation élémentaires se réduisent ainsi au regroupement de trois ou quatre individus. La figure ci-dessous montre les trois figures d'organisation élémentaires :

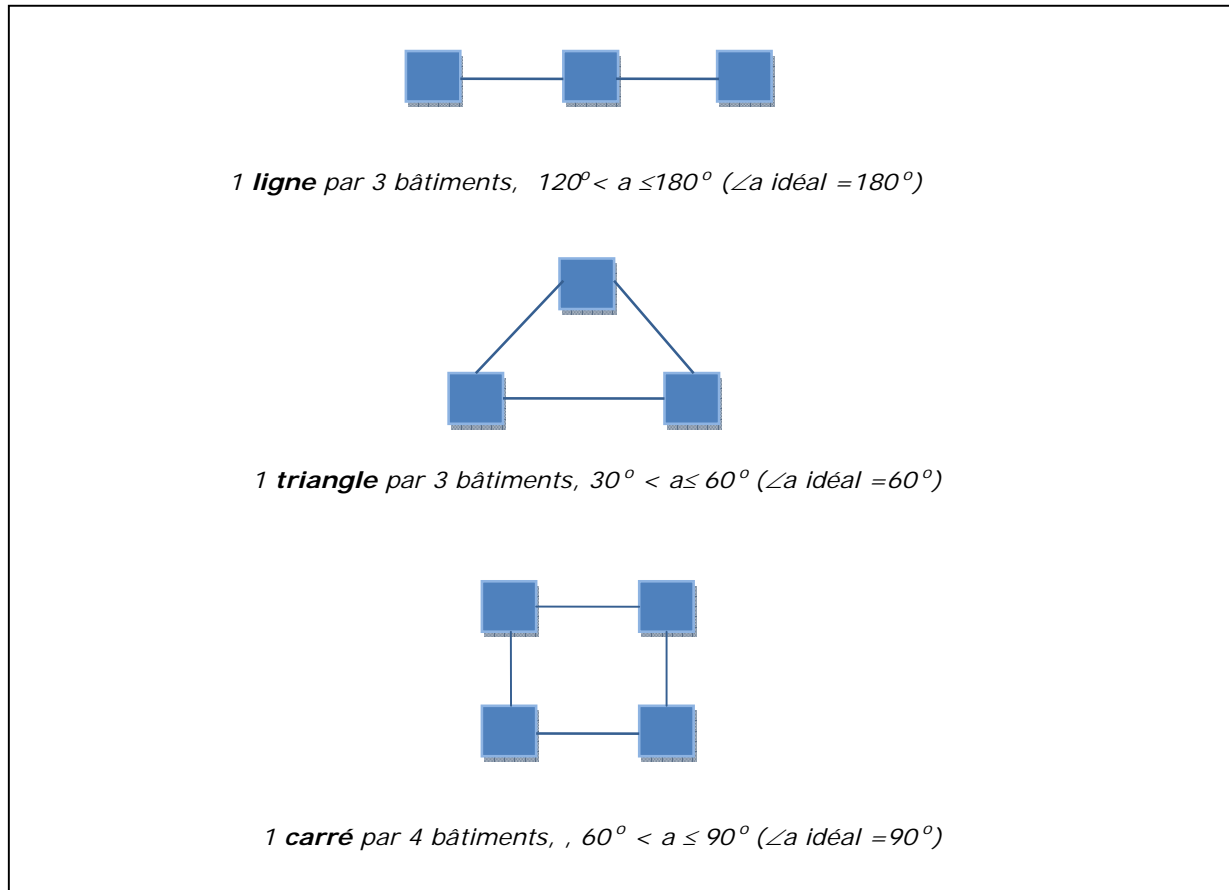


Figure 11 : Trois figures d'organisation élémentaires

Étant donné que ces formes d'organisation simples, basées sur la notion de groupe et d'invariant, se répètent lors d'une transformation symétrique à travers la singularité de lieu, nous posons l'hypothèse

⁵ Au-delà de la diversité des formes architecturales et urbaines que l'histoire des civilisations et les sociétés modernes ont produit, les formes d'espace qu'elles engendrent ont des caractères permanents et transculturels. Les formes de la ville ne peuvent résulter de la table rase ni de la pérennité des formes, mais d'une genèse à partir des figures anthropologiques de l'espace, extrait sur BERGER Patrick, *Figure*, www.patrickberger.fr

qu'elles produisent également différentes formes globales correspondant à chaque ville⁶ d'aujourd'hui. L'échelle globale sera donc également investiguée.

La dynamique des groupes

Les groupes perpétuent leur dynamique initiale en ajoutant ou en supprimant des voisins selon les changements dans leur environnement. Ces groupes instables continuent à se transformer eux-mêmes dans le temps et l'espace.

Nous avons ainsi 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 instable nous a ainsi permis de déduire les lois de croissance suivantes :

- ✓ 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

Nous avons remarqué que l'ensemble des individus qui se transforment selon ces lois se recompose toujours en cherchant une distance régulière ou plutôt équilibrée qui correspond de la densité actuelle. Il s'agit de la notion d'« équidistance ».

Les deux images ci-dessous proposent un exemple concret de complétude et d'extension.

⁶ Chaque ville à travers son histoire s'est formée par combinaison de programmes successifs avec les caractéristiques de son site. Ces états naturels et construits sont l'objet d'une morphogenèse. Leur entrelacement physique définit chaque milieu qui produit des formes qui l'identifient. Ces formes spécifient la morphologie des villes ... extrait sur BERGER Patrick, *ibid.*



Figure 12 : Commune de Saint-Sulpice dans l'ouest lausannois en 1900 (à gauche) et en 1940 (à droite)

La figure 12 ci-après illustre sur un plan schématique les lois de complétude et d'extension des groupes d'habitat, telles que définies par Jong-Jin Park en l'état actuel de l'avancée de son travail de doctorat.

La figure 13 propose une illustration schématique de la loi de densification des groupes constituant les îlots urbains.

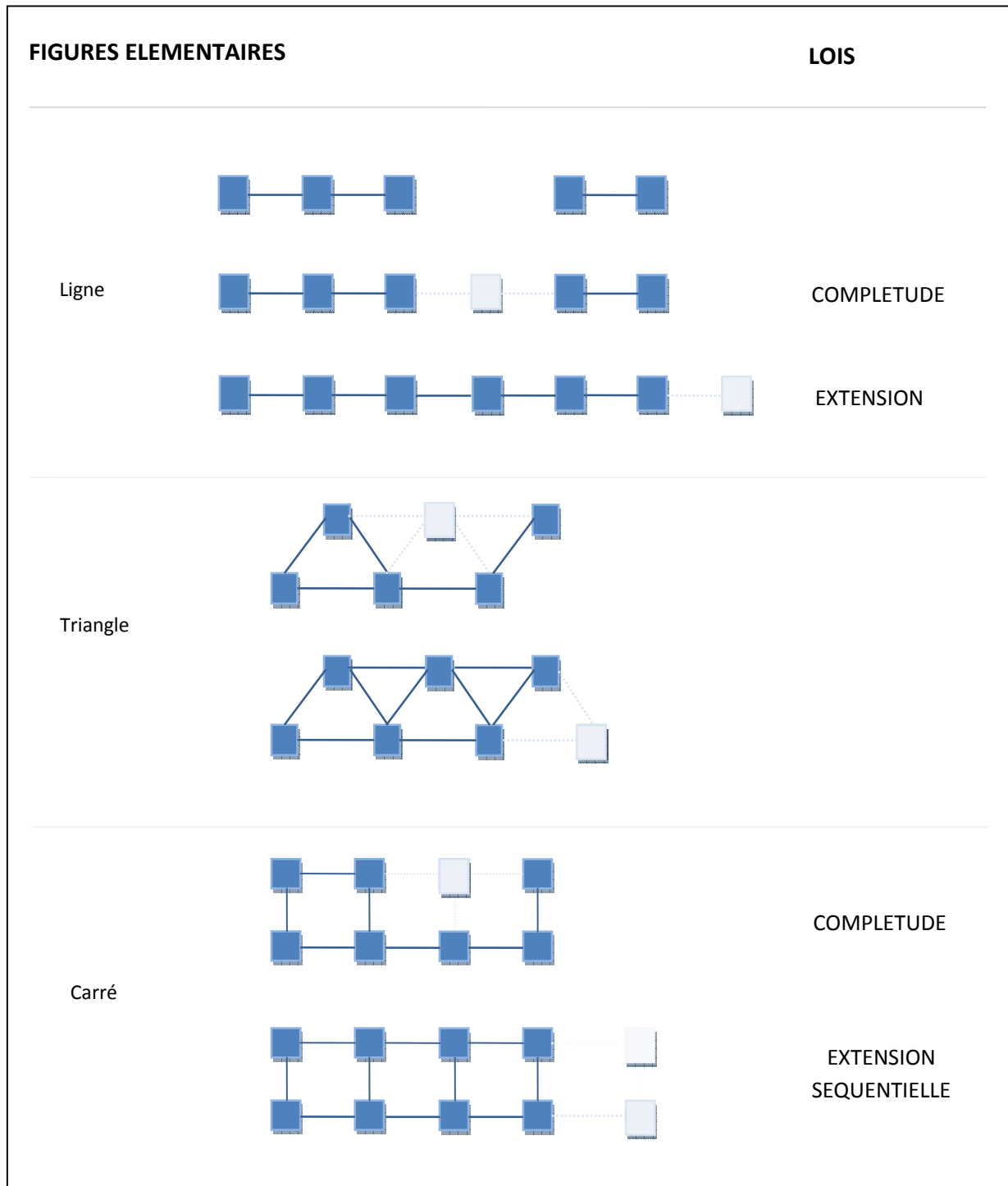


Figure 13 : Illustration schématique des lois de complétude et d'extension des groupes d'habitat

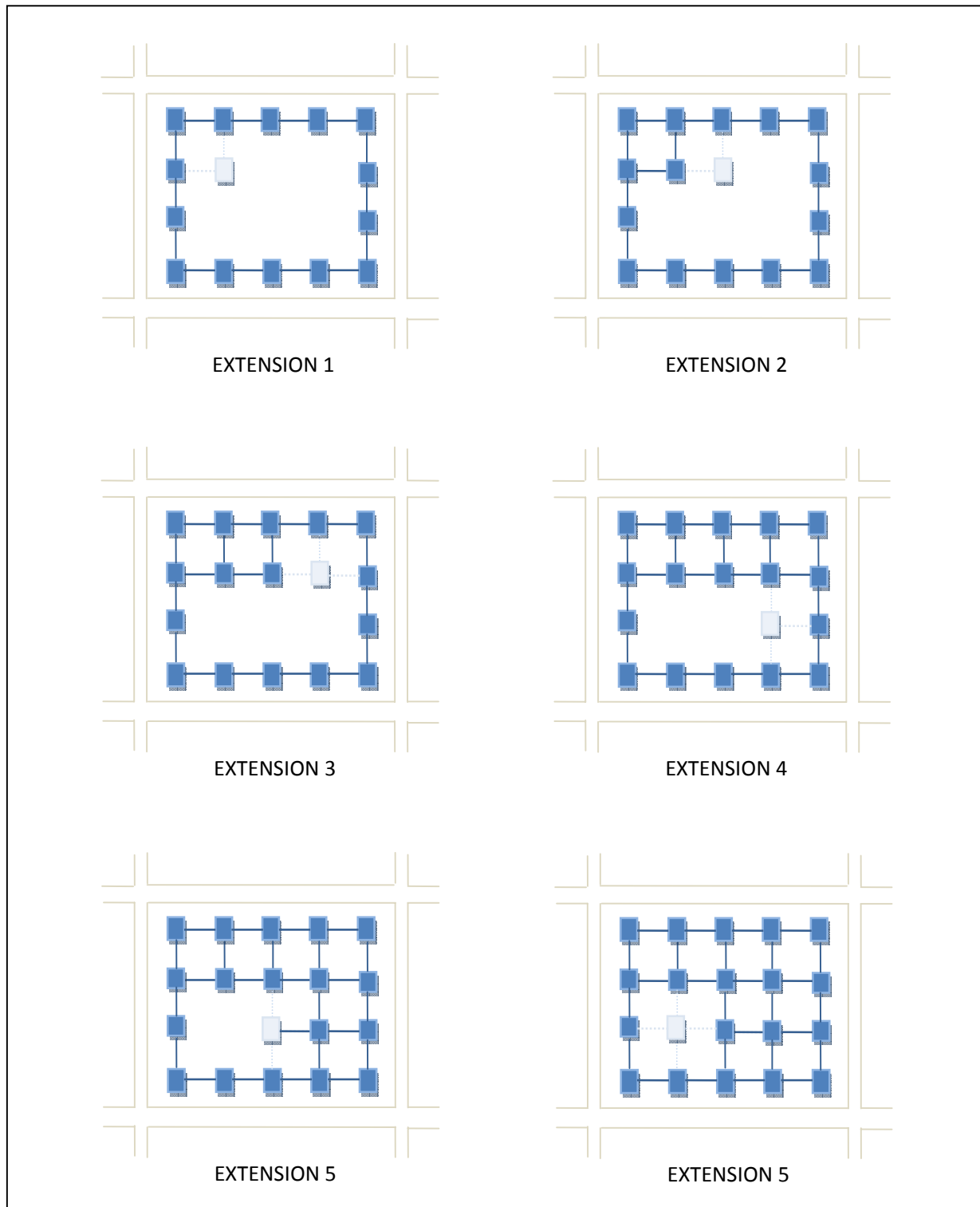


Figure 14 : Illustration de la loi de densification des îlots urbains

LES SYSTÈMES URBAINS

La phase d'observation nous a également permis de mettre en évidence la nécessité de modéliser la notion de **système urbain** qui peut devenir un **quartier**, dès le moment où il acquiert une identité suffisamment forte⁷. Ce type d'abstraction peut avoir une influence forte sur son environnement.

Les groupes d'habitats, eux-mêmes rattachés à un espace public (rue, place ou parc), et liés à des équipements proches, forment un nouvel élément du modèle au niveau MESO que nous appelons **système urbain**.

Un système urbain, pour s'appeler ainsi, comprend au moins un espace public EP (rue, place ou parc), au moins un équipement E, et au moins un groupe d'habitat GH.

Ainsi en langage ensembliste, un système urbain (**S**) peut être défini comme suit :

$$S = EP \cup E \cup GH = \{ EP_{m|m \geq 1}, E_{n|n \geq 1}, GH_{p|p \geq 1} \},$$

n, m et p étant les nombres d'éléments des sous-ensembles respectifs

GH étant le sous-ensemble des groupes d'habitat

E étant le sous-ensemble des équipements, i.e. 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.

EP étant le sous-ensemble des espaces publics, i.e. lieu ouvert caractérisé par un flux important de personnes utilisant les services publics à disposition ou encore par une forte concentration d'équipements alentour qui font vivre les activités publiques et privées du voisinage. Ce peut être une rue, une place ou un parc public.

Dans l'histoire de la ville occidentale, on trouve souvent des espaces publics couplés à des équipements « EP - E », autour de groupe d'habitats GH ou d'ensembles d'équipements E, qui fonctionnent comme un centre ville.

Par exemple, en face de l'hôtel de ville, on voit toujours une place du marché pour échanger du matériel, ou une église avec une place. Selon le changement de la société, nous voyons ici d'autres sortes de centralité de la ville qui se reconstituent par des ensembles complexes.

⁷ La notion d'identité de quartier est encore à préciser à ce stade du projet.

Programmes & équipements

Les Programmes⁸ évoluent et ré-organisent perpétuellement la ville.

Nous proposons un nouveau concept de centres urbains. Il s'agit de la notion de « *centre de gravité programmatique* » déduit de l'agencement des programmes complexes.

- ✓ Combinaison et détection des programmes potentiels.
- ✓ Géométrisation de lien entre ces programmes.
- ✓ Repérage du centre de gravité par géométrie donnée.
- ✓ Établissement du système urbain dans un rayon de 400m depuis ce centre de gravité.

L'addition, la suppression du programme ou la décomposition des programmes selon le besoin et le changement de la société modifie et redéfinit autrement la centralité afin que la ville puisse aboutir sa morphologie dynamique et programmatique.

En général, l'équipement est l'ensemble des installations, des réseaux, des bâtiments qui permettent d'assurer à la population résidente et aux entreprises les services collectifs dont ils ont besoin. Ces équipements *collectifs* deviennent ainsi des éléments *structurants* du système urbain.

Les programmes d'équipements peuvent être distingués par catégories :

- ✓ Administratifs : hôtels de ville, centre de commun, police, centre de secours -incendie, prison
- ✓ Éducatives : écoles (carte scolaire, collège et lycée), grandes écoles, université
- ✓ De santé : hôpitaux, cliniques, cabinets médicaux, laboratoires d'analyse
- ✓ Commerciaux : centres commerciaux, hypermarchés, magasins, boutiques
- ✓ Culturel et de loisir : centre socio -culturel, salle de spectacle, cinéma, théâtre
- ✓ Sportif : centre sportif, salle de sport, piscine
- ✓ Religieux : églises, mosquées
- ✓ Industriels : usines, centrales, incinérateurs, ateliers
- ✓ De transports : gare, port, aéroport

Autour de l'idée d'organisation programmatique, nous voyons que certaines apparitions de centres en fonction des équipements permettent de comprendre la ville différemment. En conséquence, nous observons 3 modes différents d'apparition de nouveaux centres de gravité dans la ville contemporaine :

- ✓ Grand centre (un programme majeur) : gare, port, aéroport, lycée, université, grands-écoles, centres commerciaux, hypermarché, congrès, stade, hôpitaux, etc.
- ✓ Multi centre (plus de 2 différents - idéalement plus 3 - programmes recomposés) : hôtel de ville ou église – commerces– hôtels / restaurants ; les groupes scolaires ou les collèges – les équipements sportifs – culture/loisir ; commerces – culture/loisir – sport/détente

⁸ Un programme est l'intention et la finalité auxquelles devra répondre le bâtiment

- ✓ Plusieurs petits (plusieurs programmes identiques répétés): cybercafé- cybercafé- cybercafé

Un grand E accompagne les autres centres (articulation)

Le centre historique associe aux autres programmes (coordination)

Des petits programmes privés et singuliers se répètent et organisent la ville différemment.

Activités urbaines et programmes d'équipements

La forme d'organisation des équipements programmés dans un système urbain est essentielle pour produire des activités urbaines complexes et pour caractériser le lieu urbain.

Activités ← Programmes / Equipements

Nous pouvons élaborer les différentes *activités urbaines*⁹ telles que :

- ✓ *Le logement* : L
- ✓ *Les activités industrielles et artisanales (Production de biens matériels)* : AI
- ✓ *Les activités commerciales (Distribution de biens matériels)* : AC
- ✓ *Les services (Production et distribution de biens non matériels)* : AS

Donc, nous voyons 3 activités urbaines majeures – activités industrielles, commerciales et de services - qui correspondent aux équipements programmés de la ville.

Phénomène et mutation des programmes dans le système urbain

Nous pouvons aussi observer certains phénomènes particuliers :

- ✓ $E_{ai}, E_{ac}, E_{as} \rightarrow E_{ai+ac+as}$: *des équipements monofonctionnels aux équipements multifonctionnelles*
- ✓ $E \rightarrow EP$: *l'espace public est remplacé par un grand équipement complexe comme un centre commercial, un cinéma multiplexe, etc.*
- ✓ $E \rightarrow E$: *délocalisation des équipements*
- ✓ $E_{ai} \rightarrow E_{ac}, E_{as}$: *E industriel se transforme en E commercial, E service ou E complexe.*

Nous supposons que certaines mutations de programme basées sur l'inter ou trans-action peuvent engendrer d'autres formes d'agencement de système complexe de la ville contemporaine.

⁹ [Lécureuil, 2001]

STABILITE / INSTABILITE (DYNAMIQUE)

Comme nous l'avons vu, la plupart des lois elles-mêmes peuvent avoir une durabilité variable dans le temps, et sont instables. Elles dépendent grandement des modes et des cultures. Comme dans toute vie, des événements peuvent venir perturber le cours « normale » des choses pour chaque objet constituant la métropole, chaque quartier, pour la métropole elle-même : changements dans l'environnement voisin, formation d'un nouveau bâtiment indésirable, destruction d'un service influant, décision politique, catastrophe naturelle, etc. Nous introduisons ici la dynamique du système.

ESPÉRANCE DE VIE

Comme tout organisme vivant, les éléments qui constituent la métropole ont une espérance de vie limitée dans plupart des cas, plus ou moins grande, et qui décroît avec le temps. En d'autres termes, ils tendent à *se transformer* ou *disparaître* naturellement pour faire place à d'autres plus en adéquation avec l'environnement voisin.

De manière générale, nous pouvons considérer que les éléments naturels (lac, montagne, etc.) sont les seuls objets stables, i.e. qui ont une espérance de vie « illimitée », sur le temps de la simulation (soit hors catastrophes naturelles). Par exemple le Cervin a une stabilité maximale.

Les monuments historiques ont également une stabilité très élevée. Une église par exemple aura une stabilité très forte, i.e. elle a une durée de vie sur plusieurs centaines d'années, dans la mesure où elle fait partie du patrimoine culturel à conserver.

Une villa aura une durée de vie de 30 ans en moyenne, alors qu'un centre commercial est relativement plus instable, puis qu'il est rentabilisé au bout de 15 à 20 ans.

En cas de rénovation, la valeur de stabilité d'un bâtiment change bien évidemment, et modifie la valeur du quartier.

CHANGEMENT DE PROGRAMMATION

Cette loi de durée de vie des objets est basique, en ce sens qu'elle correspond au cours de la vie « normale ». Et comme dans la vie, des événements peuvent venir perturber le cours des choses : changements dans l'environnement voisin, décisions politiques, catastrophes naturelles, etc.

Ainsi par exemple on sait qu'aujourd'hui les zones d'affectation de type verdure sont moyennement stables. Elles présentent une forte probabilité de se transformer en zone habitation faible densité dans les 10 prochaines années, et d'induire la *formation* de villas à moyen terme.

Une mesure politique peut entraîner la transformation d'une autoroute en route principale à 4 voies, avec une probabilité très faible. Mais ça arrive !

Un bosquet peut se transformer en forêt avec une probabilité extrêmement faible. Ceci peut être un événement d'importance, puisqu'il a pour conséquence d'interdire toute urbanisme dans un rayon de 30 mètres autour.

FORMATION DE BÂTIMENTS

La création des logements est liée à la croissance, comme exposé en section 3.2.1.1. La formation de services est induite par les logements, plus précisément par la population estimée occupant les logements. Ainsi en règle générale, il y a une forte probabilité de formation d'un nouveau service quand le nombre de logements devient plus élevé que le nombre estimé que peut desservir le service.

En d'autres termes, la formation de bâtiments liée à la croissance plus ou moins en continu se fait jusqu'à un certain point à partir duquel une dynamique s'installe qui induit des changements en cascade.

La formation d'un quartier de villas a une forte probabilité d'appeler la formation d'une école, d'un petit commerce, etc.

La création de gare dans une métropole est un évènement rare. Mais elle a des conséquences considérables dans la redistribution des objets environnants. En général elle entraîne notamment la formation de bâtiments de bureaux à plus ou moins long terme, de commerces divers, etc.

Regroupement

Le phénomène de regroupement de bâtiments est Lorsque des bâtiments de même type se forment dans un périmètre voisin, l'agrégation de ces bâtiments de plus en plus nombreux tend à créer un force qui augmente avec le nombre, et influence de plus en plus le voisinage.

Si un logement fait parti d'un quartier, il devient plus stable qu'une maison seule. Si de plus en plus de maisons se forment, le groupe devient de plus en plus fort, i.e. acquiert une influence de plus en plus importante.

Ainsi une usine nuisible pour le quartier deviendra de plus en plus instable en regard de la force du groupe. Si une école vient logiquement s'installer en plus, le quartier repousse encore plus l'usine, qui perdra encore en stabilité.

Si 4 parcelles de plus de 1000 mètres carré se remplissent, il y a formation d'une nouvelle rue (à 90%).

Remplacement

La localisation des services à créer est liée à l'instabilité des bâtiments et des quartiers. Si de grands espaces de terrain se vident, il y a une forte probabilité d'apparition de grands programmes aux alentours : gare, centre de congrès, piscine olympique, etc. Donc à partir du moment où un quartier est composé de bâtiments en fin de vie, il devient très instable et a de fortes chances d'être remplacé.

CHANGEMENT DE POUVOIR SYMBOLIQUE => APPARITION

Le pouvoir symbolique que peut exercer un programme ou un élément naturel constituant la métropole a une validité aujourd'hui et dans nos régions. Sa valeur peut donc changer au cours du temps et avoir des conséquences importantes sur la dynamique de croissance de la métropole.

C'est l'exemple déjà cité de la ville de Zermatt qui a vu soudain « apparaître » le Cervin comme un objet incontournable pour son urbanisation.

CHANGEMENT D'INFLUENCE FONCTIONNELLE

L'influence entre fonctions est un facteur susceptible de changer relativement fréquemment dans le temps. Nous avons introduit dans le système des valeurs valables aujourd'hui et dans nos régions. Ces valeurs seront modifiées au cours du processus dynamique.

De plus les influences ont des degrés d'importance les unes par rapport aux autres. Actuellement on sait que les usines sont une nuisance très forte pour les villas, alors qu'elle est moins importante pour les habitations forte densité.

6 Modélisation de la métropole

DONNEES DE BASE

Nous considérons la métropole du point de vue matériel. Les objets pris en compte sont

- ✓ les bâtiments et leur(s) programmation(s) (aussi appelée *fonction* dans la suite de ce document)
- ✓ leur environnement construit : routes, réseau ferroviaire, etc.
- ✓ leur environnement physique naturel : topographie, rivières, surfaces boisées, etc.

Les données de base dont nous disposons à l'école proviennent de l'office fédéral de topographie (SwissTopo) et du service du cadastre de l'état de Vaud.

La base de données du **cadastre vaudois** est constituée du bien-fonds (parcelles et domaines publics) et de la couverture du sol (routes, chemins, bâtiments, murs, forêts, vignes, cours d'eau). Ces données sont extraites de la mensuration officielle (BDCO) aux coordonnées nationales suisses. L'échelle du plan cadastral est fonction de la zone et du degré de précision recherché (en principe 1:500 en zone urbaine, 1:1000 en zone agricole et 1:5000 en zone de montagne).

La base de données **Vector 25** de SwissTopo offre un modèle numérique du paysage de l'Office fédéral de topographie (SwissTopo) au format vectoriel. Les données ont été obtenues par vectorisation des cartes nationales pixel au 1:25'000. La mise à jour s'effectue tous les 6 ans. La précision de la position est de 3 à 8 m (cela correspond à la précision de la carte).

Le modèle numérique de terrain à maille 25 mètres (**MNT25**) de SwissTopo fournit les données altimétriques.

Enfin nous utilisons les **orthophotos** numériques couleur de SwissTopo pour la visualisation.

Le schéma conceptuel de la figure ci-dessus au format *Entité Relation Etendu* regroupe les classes d'objets sélectionnées dans ces différentes bases de données pour le projet.

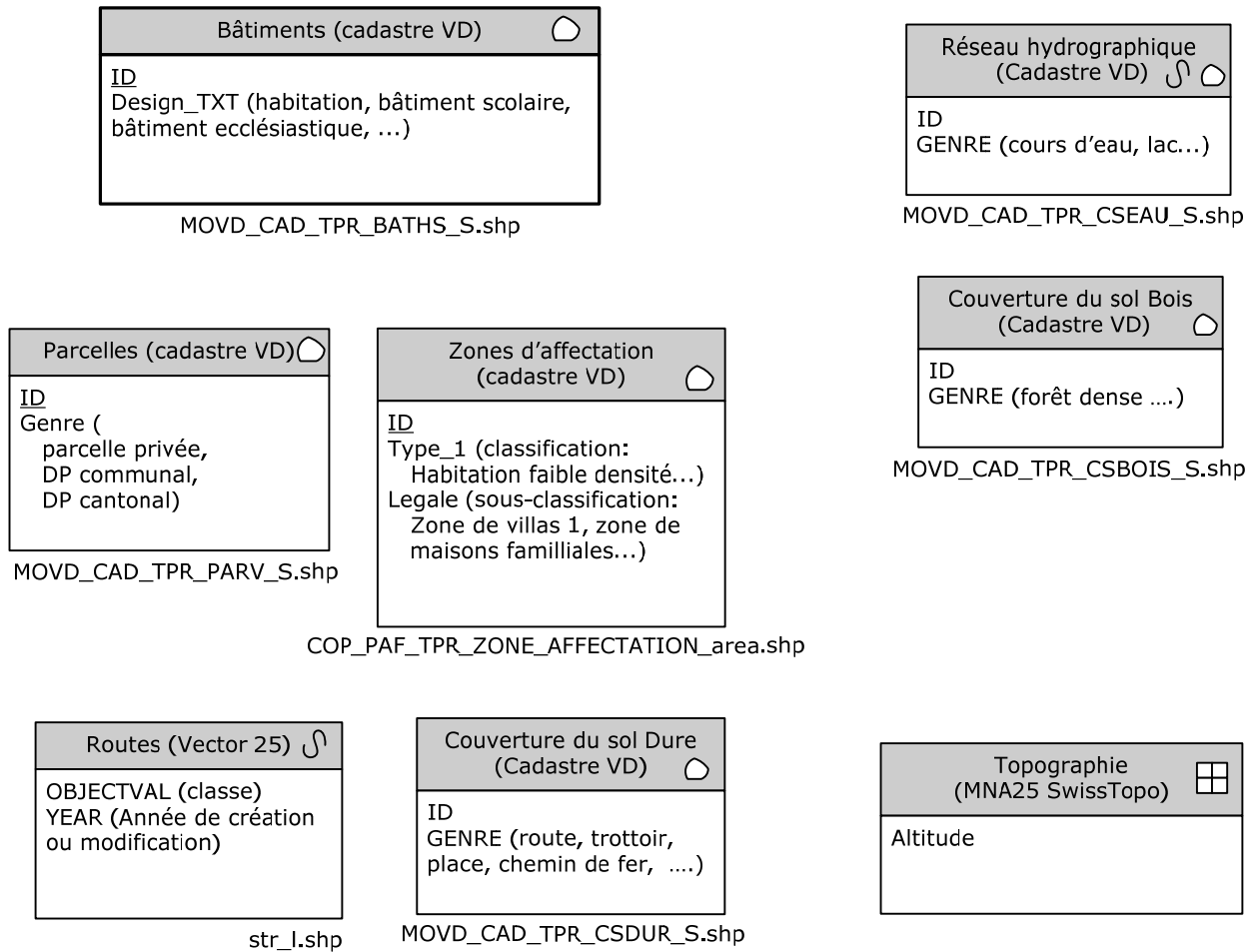


Figure 15 : Schéma conceptuelle de la base de données initiale

LE SCHEMA CONCEPTUEL DES DONNEES

Notre schéma conceptuel des données prend en considération la métropole du point de vue de sa matérialité dans son usage programmatique¹⁰.

La modélisation SIG 3D vecteur a pour objectif d'offrir l'abstraction du monde réel permettant une représentation sensible de la métropole et de ses lois de morphogenèse nécessaire à sa simulation.

Les objets de base pris en compte pour modéliser la métropole sont :

- ✓ les bâtiments et leur(s) programmation(s) (aussi appelée *fonction* dans la suite de ce document)
- ✓ leur environnement construit : routes, réseau ferroviaire, etc.
- ✓ leur environnement naturel

MODÉLISATION MULTI-ÉCHELLE

Nous présentons dans cette section le modèle de données multi-échelle théorique de la ville établi sur la base de différents niveaux d'observation et de regroupement des objets de l'environnement naturel et construit qui constituent la ville.

Nous nous focalisons sur 3 niveaux d'abstraction de la métropole (adapté de [Boffet, 2001]) :

- ✓ L'échelle locale (ou micro) comporte les objets micro directement observables qui constituent la métropole (bâtiments, et leur environnement naturel et construit) et que nous souhaitons manipuler et voir figurer dans le processus de simulation.
- ✓ L'échelle intermédiaire (ou meso) dont le niveau d'abstraction correspond à la vision que l'on peut avoir d'un ou plusieurs quartiers. Nous avons défini à ce niveau les notions de groupe et de système sur la base des lois morphologiques observées et présentées au chapitre précédent.
- ✓ L'échelle globale (ou macro) correspondant au niveau d'abstraction de la métropole dans son entier avec les liens principaux entre grands programmes, réseaux structurants et instances dirigeantes de la ville et de la métropole elle-même.

¹⁰ Dans ce premier projet sur la morphogenèse de la métropole, les aspects sociaux et démographiques ne sont pas pris en considération.

Le schéma ci-dessous apporte une vue schématique des différents concepts introduits dans le modèle de description multi-échelle de la métropole qui seront introduits dans le système multi-agent.

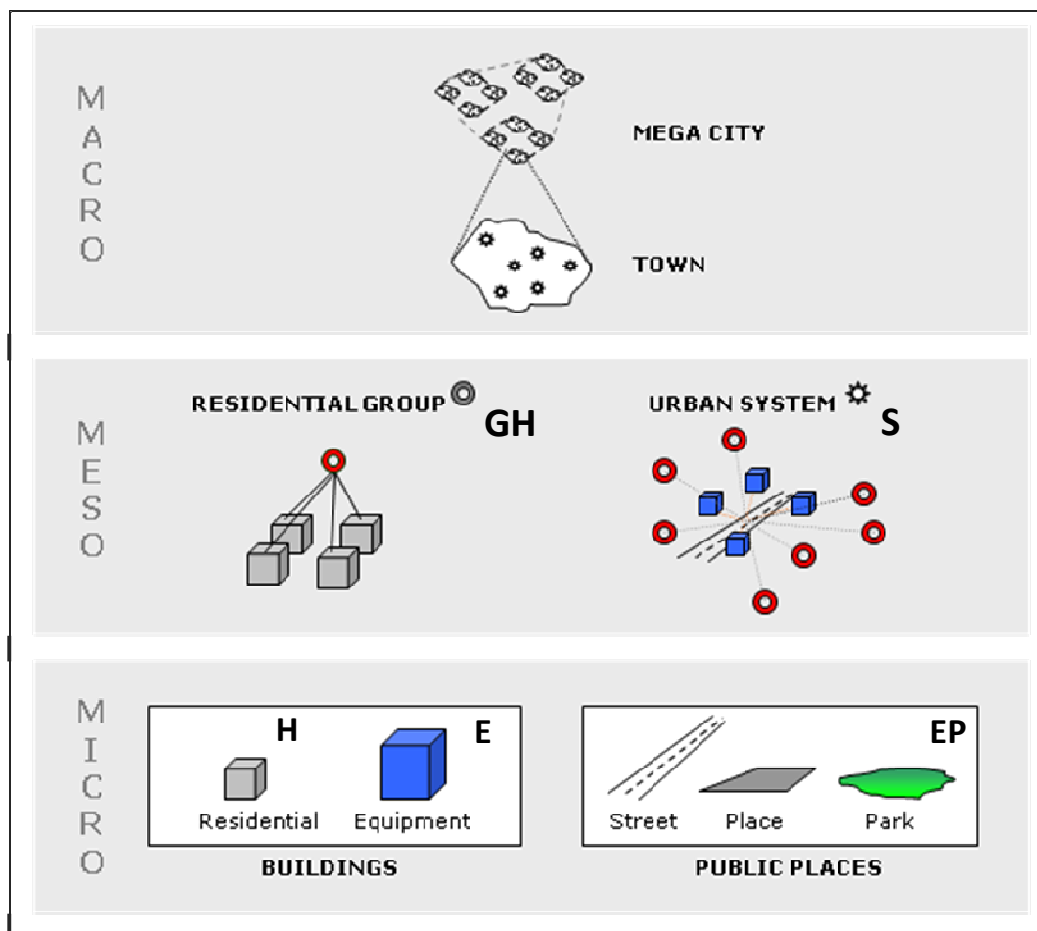


Figure 16 : Vue simplifiée de la modélisation multi-échelle de la métropole

NIVEAU MICRO : OBJETS INDIVIDUELS NATURELS ET CONSTRUITS

Notre point de vue sur la métropole concerne les programmes, i.e. des unités élémentaires partageant un usage commun (logement, commerce, travail, loisir, etc.).

Au niveau micro (échelle d'observation locale), l'aspect programmatique du milieu urbain nous conduit à distinguer les programmes suivants :

Le bâti : Ce peut être un bâtiment, une ou plusieurs surfaces abritées par un bâtiment, ou un ensemble de bâtiments.

- ✓ Habitat (H) : un tissu bâti spécialement affecté aux logements qui constituent en général la fonction principale de la ville. Ce peut être une maison individuelle, ou un logement collectif de moyenne ou de forte densité.
- ✓ Équipement (E) : bâtiment à usage collectif qui permet 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. Les équipements jouent un rôle important en tant qu'attracteur ou répulseur en milieu urbain.

Les réseaux : rues, routes, réseaux de transport publics et leurs arrêts (train, bus, metro), réseau hydrographique.

Les espaces publics (EP) : On définit un espace public comme étant un lieu ouvert caractérisé par un flux important de personnes utilisant les services publics à disposition ou encore par une forte concentration d'équipements alentour qui font vivre les activités publiques et privées du voisinage. Ce peut ainsi être :

- ✓ Rue : tronçon de rue particulier. Par exemple : *Broadway avenue* à New York ou *Oxford Street* à Londres.
- ✓ Place : lieu public découvert constitué par un espace vide et des bâtiments alentour. Elle est historiquement associée à au moins un édifice essentiel ou prestigieux de la ville et aux systèmes de circulation pour piétons ou véhicules. Par exemple, la *Piazza del Campo* à Sienna ou la *Place du Palais Royal* à Paris.
- ✓ Parc : espace vert aménagé pour accueillir les activités ou loisirs des citoyens. Par exemple, *Central park* à New York ou *Hyde park* à Londres.

Cette échelle micro obéit à une dynamique et à des lois qui lui sont propres et doit être ainsi considérée à part entière. En effet, une bonne partie des processus morphogénétiques urbains se déroulent à une échelle locale. Les bâtiments d'habitats, les équipements collectifs de type bâti et les espaces publics sont ainsi les principaux *agents micro* du système multi-agents que l'on présentera par la suite.

Les espaces publics n'ont pas été introduits à proprement parlé dans le schéma conceptuel puisqu'ils peuvent être différents objets déjà représentés dans le schéma. La notion de place pose encore problème, et n'a pas été clairement définie à ce stade du projet.

NIVEAU MESO : GROUPES D'HABITAT ET SYSTÈMES URBAINS

L'échelle intermédiaire (ou méso) comporte les objets agrégés : les groupes d'habitat et les systèmes urbains qui sont définis plus loin dans ce chapitre.

NIVEAU MACRO : VILLE ET MÉTROPOLE

Nous n'avons pas à ce stade du projet de spécifications encore claires quant aux objets macro qui seront nécessaires à l'échelle globale.

Néanmoins ces objets devront comporter des mesures globales : densité moyenne, nombre moyen de bâtiments par services, etc. qui permettront de caractériser la qualité ou l'équilibre globale de la métropole dans son entier. Ce point est à définir en fonction de l'avancée des recherches sur l'optimisation.

Dans un premier temps, nous pouvons imaginer que de tels objets seront les communes, et les centres urbains, pour le cas où nous ajoutons la notion de centralité. A tous les niveaux, les composantes infrastructurelles et naturelles : autoroute, CFF, rivière, lac, etc. seront toujours présents, du fait que ce sont des éléments de continuité du paysage urbain importants.

Cependant un niveau macro, la géométrie de ces éléments de l'environnement devra être généralisée (simplification et caricature des tracés pour ne retenir que la ligne de continuité principale).

LES OBJETS CONSTRUIITS

Nous définissons maintenant plus précisément les objets constituant le modèle aux différentes échelles.

Le schéma UML ci-dessous reprend l'extrait du schéma conceptuel des données UML complet concernant les objets construites.

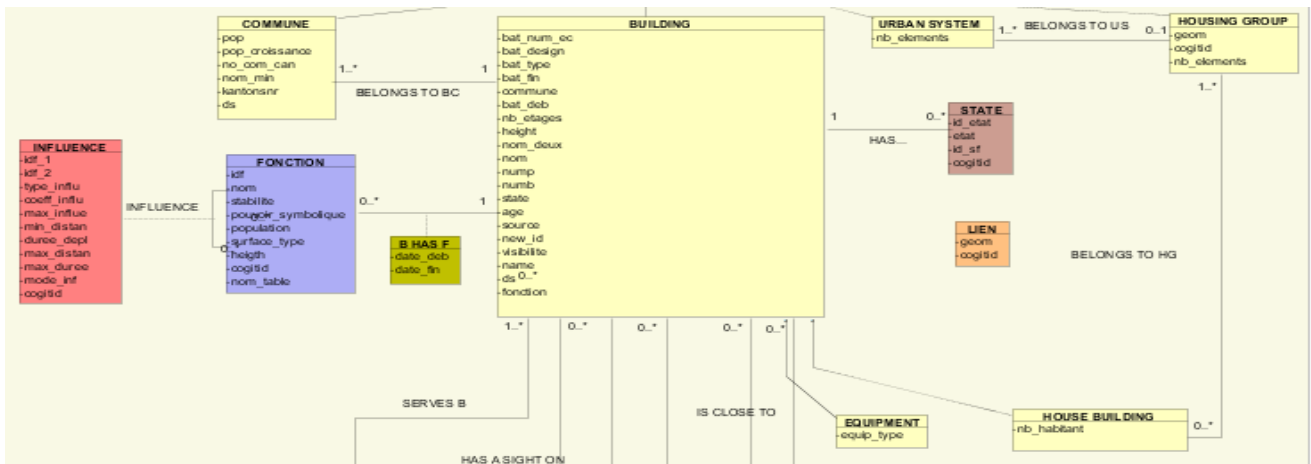


Figure 17 : Extrait du schéma UML concernant les objets construits

LES BATIMENTS

Les **bâtiments**, que ce soient des logements ou des services, sont répertoriés dans la classe *bâtiment* dont chaque objet possède :

- Un identifiant (numéro unique permettant de le distinguer des autres)
- La désignation cadastrale, à partir de laquelle nous pourrions partiellement dériver la fonction du bâtiment
- La géométrie surfacique
- La date de création du bâtiment (à saisir d'une source extérieure, ou à relever sur le terrain)
- Sa hauteur (approximée en fonction du nombre d'étages)
- Son nom (facultatif)
- Sa surface (fonction SIG)
- Son coefficient d'occupation de la parcelle (COS)
- Son coefficient d'utilisation de la parcelle (CUS)

LES INDICATEURS MORPHOLOGIQUES SUR LES BÂTIMENTS

Chaque bâtiment possède également des caractéristiques de forme dans le but de détecter des regroupements d'habitat. , nous calculons les caractéristiques suivantes :

- Orientation
- Élongation
- Surface
- Complexité 2D = nombre de points constituant la surface
- Complexité 3D : volume = nombre de faces
- Volume approximé = surface x hauteur
- Volume global 3D (en m³)
- Classe de toit

La figure ci-dessous illustre chacun des indicateurs de formes qui nous permettent de détecter les regroupements de bâtiments. Nous verrons plus précisément dans le chapitre suivant comment ces indicateurs sont calculés.

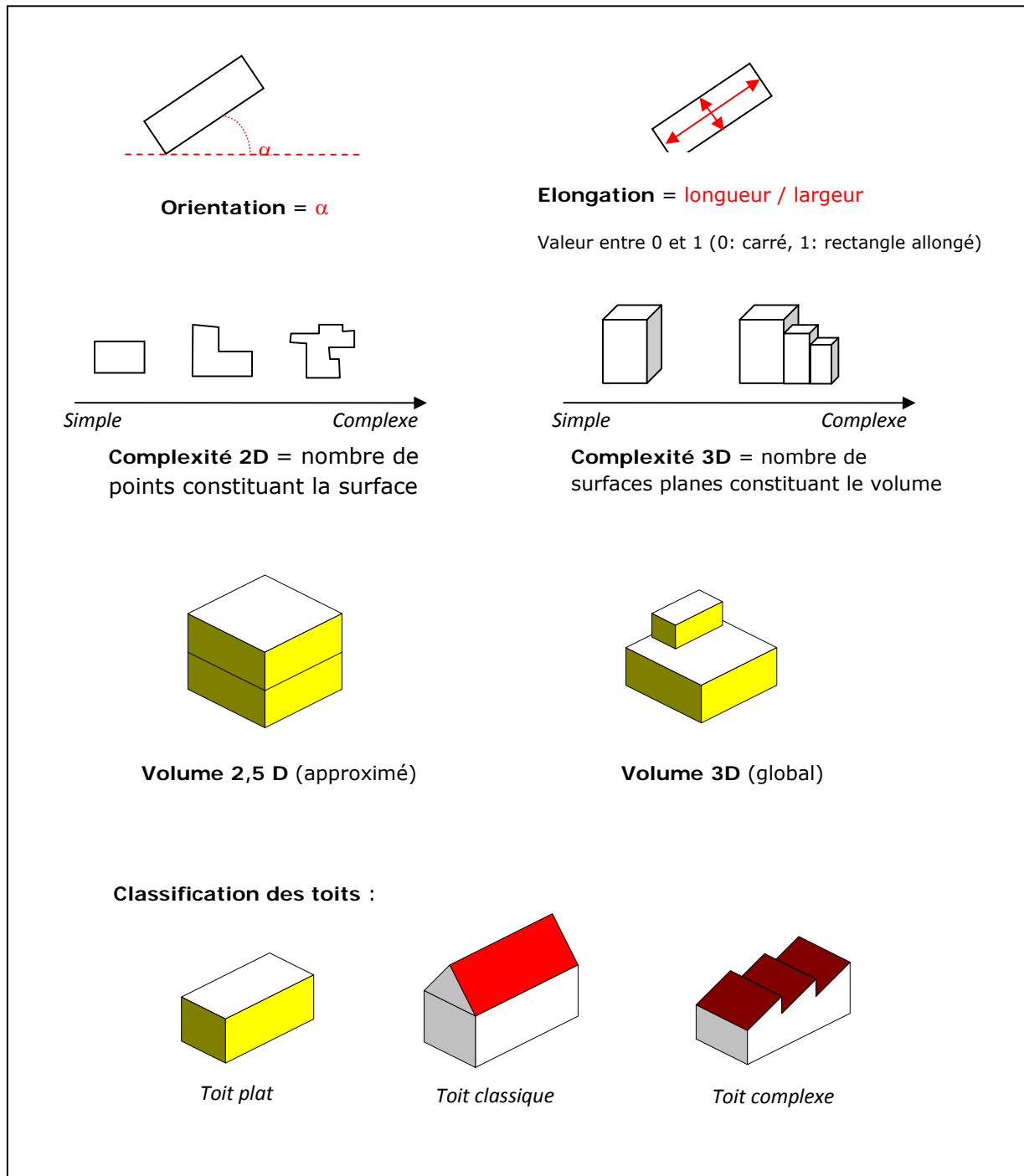


Figure 18 : Indicateurs morphologiques des bâtiments

Un travail de recherche a été entrepris conjointement avec Claudio Carneiro, doctorant au laboratoire LaSIG, dans le but d'appliquer les données 3D LIDAR¹¹ pour le calcul des indicateurs morphologiques 3D : complexité 3D, volume global 3D, et classe de toit. Le calcul des autres indicateurs est explicité dans la section suivante sur la détection des groupes d'habitat.

Ces indicateurs apporteraient en effet une bien plus grande précision dans le calcul de volume des bâtiments notamment. Actuellement le prototype implémente une modélisation 2,5 D. C'est-à-dire que le volume est approximé à la surface du bâtiment (telle que saisie dans le cadastre ou dérivée des résultats de simulation) multipliée par la hauteur (approximée selon le nombre d'étages connu ou relevée sur le terrain).

Avec les données LIDAR, les bâtiments sont modélisés par un nuage de points dont on connaît l'altitude, ce qui permet d'en interpoler la forme 3D, et de réaliser ainsi des calculs de volumes ou de pentes de toit plus précis [Silva et al, 2008], [Zwolak, 2008].

LES PROGRAMMES

Nous avons établi une classification hiérarchique des usages des bâtiments, que nous qualifierons par la suite de fonctions ou usages de bâtiments.

Un bâtiment peut contenir un ou plusieurs **programmes** architecturaux, ou faire partie lui-même d'un programme : université, stade olympique, centre commercial, etc. Un programme est, par définition, hébergé dans un bâtiment¹², un bâtiment lui-même ou une composition de plusieurs bâtiments.

Ces surfaces ne sont pas modélisées dans ce premier projet sur la morphogenèse. Cependant dans un deuxième temps, elles devraient être considérés comme un agent à part entière au même titre qu'un bâtiment.

La classification hiérarchique des programmes (aussi appelés *fonctions*) est la suivante :

1. Bâtiments

11. Logements

- **111.** Logement individuel (équivalent Cadastre TYPE_I = Habitation faible densité) – R+2 = 9 m. de haut

¹¹ **LIDAR** est l'acronyme de l'expression anglosaxonne « *Light Detection and Ranging* » qui désigne une technologie de télédétection ou de mesure optique basée sur l'analyse des propriétés d'une lumière laser renvoyée vers son émetteur. Les mesures LIDAR nous permettent d'obtenir un nuage de points à la surface de la terre qui nous permettent de dériver les points modélisant des bâtiments et permettant d'en déduire un modèle 3D. Pour plus d'informations, voir [Silva et al, 2008].

¹² Ce peut être par exemple un commerce au rez-de-chaussée d'un bâtiment d'habitation moyenne densité.

- **112.** Logement collectif moyenne densité (éq. Cadastre TYPE_I = Habitation moyenne densité) - R+3 = 15*25 m. = 4 appartements par étages = 12 m.
- **113.** Logement collectif forte densité (éq. Cadastre TYPE_I = Habitation forte densité) - par ex. CUS de densité 0.8 à Lausanne

12. Écoles

- **121.** École primaire
- **122.** École 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, ...
- **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

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

32. Hydrographie

- **321.** Lac
- **322.** Rivière, fleuve

33. Verdure

- **331.** Forêt
- **1731.** Jardin familial
- **1732.** Parc urbain de quartier
- **1733.** Grand parc urbain

Les fonctions au sein d'un même bâtiment peuvent être multiples. Il arrive souvent en centre ville par exemple que les immeubles d'habitation forte densité abritent également au rez de chaussée un ou plusieurs petits commerces. Ainsi nous avons ajouté au modèle les fonctions de type bâtiment mixte suivantes :

4. Bâtiment mixte

41. Logement / Commerce

42. Logement / Travail

43. Logement / Service

44. Travail / Commerce

La table des fonctions est une donnée importante du système. Elle comporte les attributs suivants :

- Un identifiant, numéro unique,
- Un nom
- Un degré de stabilité, i.e. un nombre d'années d'espérance de vie pour chaque élément de ce type (par exemple 30 ans en moyenne pour villa)
- un indicateur de population (nombre moyen de personnes résidant dans le logement, ou requises pour l'existence du service)
- Un pouvoir symbolique pour certains objets. Ce chiffre est facultatif. Si il n'a pas de valeur, l'agent a le pouvoir attribué à sa fonction.

Chaque fonction a une stabilité, soit l'espérance de vie pour tous les objets de ce type. Cependant les objets eux-mêmes peuvent porter une valeur de stabilité, facultative. C'est le cas des programmes, qui sont souvent particuliers.

La table ci-dessous est celle qui a été implémentée dans le système avec les chiffres que nous possédons pour le moment. Elle pourrait encore être complétée et modifiée en fonction du travail de calibration du modèle :

IDF	Nom	Stabilite	Pouvoir_Symbolique	Population
111	Habitation faible densité (villas)	30	0	4
112	Habitation moyenne densité	30	0	0
113	Habitation forte densité	20	0	30
121	Ecole primaire	50	0	2000
122	École secondaire : collège, gymnase	100	0	0
123	Université, Haute école	100	3	0
124	Jardin d'enfants, crèches	0	0	0
131	Commerces de proximité (boutique)	30	0	500
132	Supermarché	15	0	3000
133	Centre commercial	15	0	0

141	Dispensaire de quartier, centre médical	20	0	2000
142	Hôpital, clinique	0	0	0
143	CHU	0	0	0
151	batiment administratif	50	0	2000
152	Lieux de culte	10000	10	500
153	Cimetière	10000	5	2000
154	Musée	0	8	0
155	Bureau de poste	0	0	0
156	Banque	0	0	0
157	Bibliothèque	0	3	0
158	Salle polyvalente	0	0	0
159	Bâtiment de service public	0	0	0
161	Bâtiment de bureaux	20	0	3000
162	Atelier d'artisanat	50	0	600
163	Bâtiment industriel	15	0	10000
164	Ferme	0	0	0
181	Restaurant, cafeteria	0	0	0
182	Hôtels	0	0	0
183	Station service	0	0	0
191	Dépendance	0	0	0
192	Toilettes publiques	0	0	0
193	Bâtiments d'entretien	0	0	0
212	Route	0	0	0
213	Sortie d'autoroute	0	0	0
214	Parking	0	0	0
215	Gare	1000	0	2000
216	Aéroport	0	0	0
217	Arrêt de bus ou metro	0	0	0
221	Canalisation d'eau	0	0	0
222	Conduite de gaz	0	0	0
311	Sommet	100000	8	0
321	Lac	100000	10	0
322	Riviere	100000	0	0
331	Forêt	1000	7	0
1711	Bâtiment sportif	0	0	0
1712	Terrain de sport	0	0	0
1713	Piscine	0	0	0
1714	Bowling, billard	0	0	0

1721	Théâtre	0	3	0
1722	Cinéma	0	0	0
1723	Centre culturel	0	0	0
1731	Jardin familial	0	0	0
1732	Parc urbain de quartier	0	0	0
1733	Grand parc urbain	0	0	0
1734	Discothèque	0	0	0
1735	Refuge	0	0	0
2111	Autoroute avec mur anti-bruit	0	0	0
2112	Autoroute sans mur anti-bruit	0	0	0
2181	Ligne CFF ou metro sans mur anti-bruit	0	0	0
2182	Ligne CFF ou metro avec mur anti-bruit	0	0	0

Table 1 : Table des fonctions

INFLUENCES ENTRE FONCTIONS

Les programmes (fonctions) voisins les uns des autres s'influencent mutuellement. Ainsi une fonction est influencée par 0 à plusieurs fonctions, et inversement influence 0 à plusieurs fonctions.

La table des influences ci-dessous traduit les valeurs d'influence positives et négatives entre fonctions. Les colonnes de la table représente les éléments suivants :

- IDF1 : numéro identifiant la fonction qui influence
- IDF2 : numéro identifiant la fonction qui subit l'influence
- Type_influence : indique si l'influence subie est positive ou négative : S pour service / N pour nuisance
- Coef_influence : coefficient de 0 à 10 indiquant le force d'influence du moins au plus influant
- Max_influence : rayon d'influence maximum en mètres au-delà duquel l'objet IDF1 n'a plus d'influence sur IDF2

IDF1	IDF2	Type_INFLUENCE	Coef_INFLUENCE	Max_INFLUENCE
163	111	N	9	1000
163	112	N	9	2000
163	113	N	9	2000
151	112	S	2	5000
151	113	S	2	5000
152	111	S	4	3000
152	112	S	4	3000

152	113	S	4	3000
163	163	S	5	500
111	111	S	8	200
112	112	S	5	200
113	113	S	5	200
152	153	S	8	400
211	132	S	9	3000
211	163	S	7	2000
322	152	S	8	1000
322	111	S	9	500
322	112	S	7	1000
113	121	S	9	500
163	132	S	9	800
113	161	S	5	1000
211	161	S	7	2000
331	111	S	9	500
121	111	S	8	1000
132	111	S	5	7000
141	111	S	7	5000
212	111	S	1	400
121	113	S	8	1000
131	113	S	5	800
141	113	S	7	2000
212	113	S	2	300
113	111	N	3	2000
211	111	N	9	3000
161	111	N	3	2000
132	132	S	4	500
161	132	S	3	1000
212	161	S	9	200
113	152	S	7	500
111	152	S	3	1000
113	131	S	9	500
322	113	S	3	500
331	113	S	3	500
215	161	S	9	500
215	132	S	9	400
132	161	S	5	1000

215	113	S	9	800
-----	-----	---	---	-----

Table 2 : Table des influences entre fonctions

Pour donner un exemple de lecture du tableau, la première ligne traduit l'influence négative (type_influence = N) forte (coef_influence = 9) de la présence d'usine (IDF1 = 163) dans l'entourage (max_influence = 1000 mètres) des villas (IDF2 = 111).

Cette table traduit également la loi d'influence de voisinage. Dans ce cas, les 2 chiffres IDF1 et IDF2 sont identiques dans la table. Par exemple, les supermarchés (IDF1 = IDF2 = 132) se groupent souvent dans un voisinage : type_influence = S, coef_influence = 4, max_influence = 1000.

LES AUTRES OBJETS CONSTRUITS

Nous avons retenu les objets de l'environnement construit suivants : **routes**, **autoroutes** et **voies ferrées**.

La classe des tronçons de routes possède :

- Un identifiant
- Une géométrie linéaire
- Une classe SwissTopo, numéro qui permet de distinguer les autoroutes des différents types de routes
- La présence ou non d'un mur anti bruit
- L'année de construction

Nous avons également besoin d'une classe d'objets ponctuels figurant les **entrées / sorties d'autoroutes**, de manière à calculer les distances d'accès des bâtiments à ces points qui ont une influence importante.

La classe des voies ferrées possède :

- Un identifiant
- Une géométrie linéaire
- La présence ou non d'un mur anti bruit
- Une classe SwissTopo, numéro qui permet de distinguer les autoroutes des différents types de routes

LES OBJETS DE L'ENVIRONNEMENT

Les objets constituant l'environnement naturel que nous retenons pour la simulation sont les suivants:

- ✓ rivières,
- ✓ lacs,
- ✓ surfaces boisées,
- ✓ éléments de la topographie.

Le schéma ci-dessous reprend un extrait du schéma UML global concernant les objets de l'environnement naturel des bâtiments et programmes.

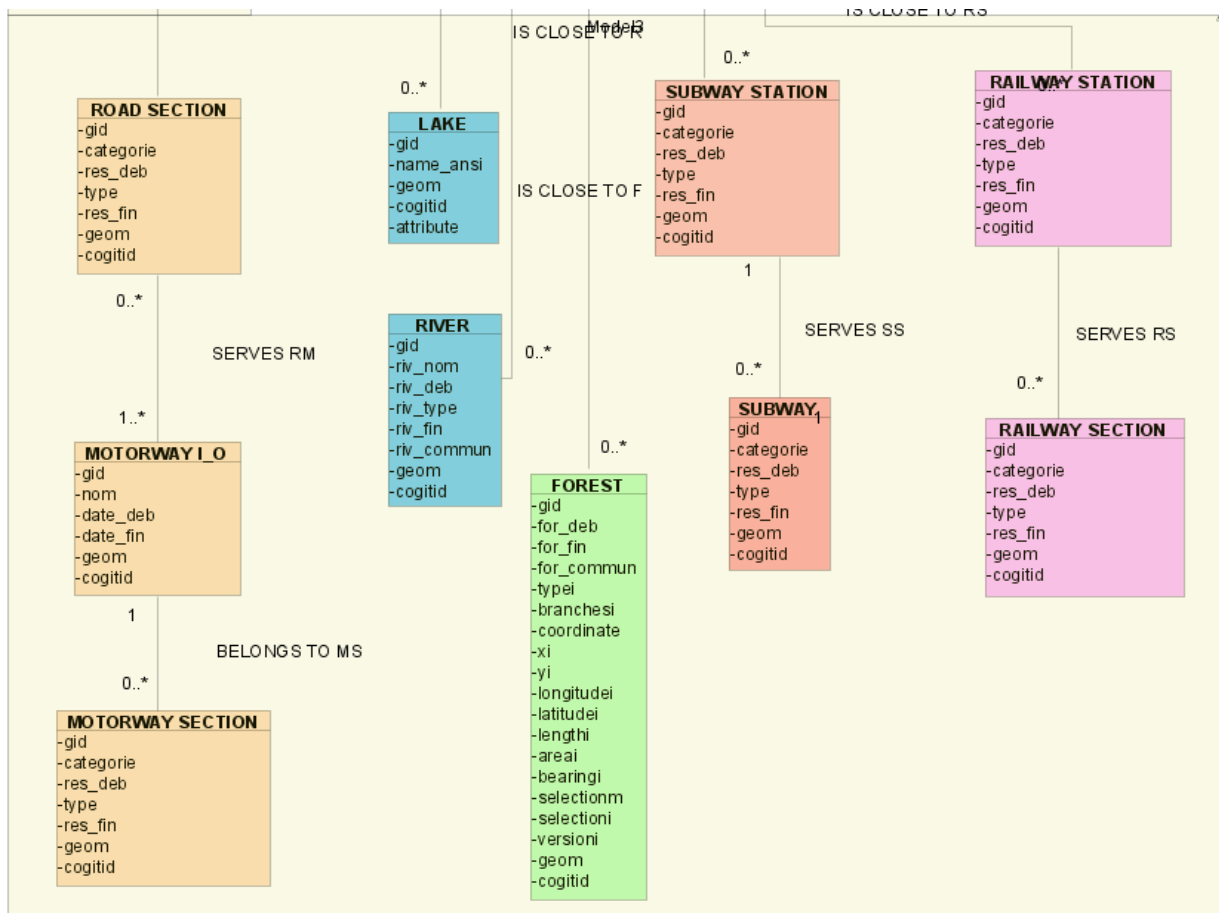


Figure 19 : Extrait du schéma UML concernant les objets construits

Pour les rivières, les lacs et les surfaces boisées, nous possédons le nom et la classification provenant du cadastre vaudois.

Pour la topographie, l'altitude est fournie par le modèle numérique de terrain à maille 25 mètres (MNT25) de SwissTopo, qui représente le sol, sans les obstacles tels que la végétation ou les bâtiments. A partir de cette grille, nous pouvons dériver les sommets (points) importants.

Cette grille, loin d'être suffisante pour fournir une visualisation 3D avec les bâtiments extrudés, doit faire l'objet d'une interpolation. Nous espérons pourvoir acquérir à l'avenir une grille à plus haute résolution.

LES GROUPES

L'observation des métropoles actuelles à l'échelle intermédiaire (échelle des quartiers ou *meso*) a révélé la présence de structures régulières et symétriques dans l'habitat qui reflètent une organisation spatiale basée sur des regroupements géométriques, comme expliqué au chapitre précédant dans la section sur les lois morphologiques. Ainsi nous introduisons un nouvel élément à notre modèle au niveau méso : les groupes d'habitat.

Ces groupes peuvent être définis comme un ensemble de bâtiments de même type, de répartition homogène, de caractéristiques et de formes similaires en terme de surface, complexité, allongement, etc., et qui présente une forte identité.

La classe Groupe possède :

- Un identifiant
- Une géométrie surfacique, correspondant à l'enveloppe convexe de l'ensemble des bâtiments agrégés
- Un type (résidentiel, industriel, etc.), sachant qu'il n'y a pas à priori de correspondance effective avec la géométrie des zones d'affectation cadastrales
- Un nombre de composants
- Un descripteur de caractéristiques de formes des bâtiments le constituant¹³ :
 - ▶ Orientation
 - ▶ Élongation
 - ▶ Complexité 2D = nombre de points constituant la surface
 - ▶ Surface
 - ▶ Volume approximé = surface x hauteur

¹³ Le descripteur de formes des bâtiments a été introduit dans le schéma conceptuel des données pour les calculs de détection des groupes d'habitat.

- ▶ Complexité 3D = nombre de faces
- ▶ Volume global 3D (en m3)
- ▶ Pente moyenne du toit

LES SYSTÈMES URBAINS

La modélisation des systèmes urbains n'a pas encore été développé plus avant à ce stade du projet.

LA VILLE

A l'échelle *macro* on considère la **ville (V)** elle-même comme étant un agent intervenant dans les processus de la morphogenèse. La ville peut se définir comme étant un ensemble de systèmes urbains en interaction. Elle se compose en outre d'éléments individuels ne faisant à priori pas partie d'un système quelconque. Ainsi :

$$V = \{S_{n/n \geq 1}, EP_{m/m \geq 0}, E_{p/p \geq 0}, H_{q/q \geq 0}\}$$

Étant donné que ces formes d'organisation simples, basées sur la notion de groupe et d'invariant, se répètent également lors de transformations symétriques dans l'espace, nous posons l'hypothèse qu'elles produisent différentes formes globales correspondant aux villes d'aujourd'hui. Plus tard, l'échelle globale sera donc également étudiée.

LA MÉTROPOLE

La métropole peut être constituée par plusieurs communes et villes selon le phénomène d'étalement et de fragmentation de la ville. De plus, chaque métropole pourrait elle-même construire sa morphologie propre basée sur la reproduction, la transformation et la réorganisation d'éléments de ville élaborée plus haut.

Ce point n'a pas encore été développé plus avant à ce stade du projet.

LA DÉTECTION DES GROUPES ET DES SYSTEMES

Afin d'enrichir les données de base, il nous a fallu développer des méthodes de détection. Nous avons ainsi développé une librairie d'algorithmes Java pour la détection des groupes d'habitat, i.e. regroupements détectés sur la base d'indicateurs de proximité et d'angularité.

Nous verrons plus loin dans ce document que la détection des groupes a ainsi pu être introduite dans le moteur de simulation Agent, permettant l'intégration dynamique de l'agent *Groupe*. Nous n'avons pas pour l'heure développé de méthode de détection adéquate pour les systèmes urbains, i.e. groupes

de logements liés aux services (écoles, commerces, etc.) et aux équipements publics. Le concept théorique définissant les systèmes n'étant pas encore suffisamment clairement établi. Nous en présentons un bref aperçu théorique dans cette section.

Ce travail fait l'objet d'un doctorat en architecture (Jong-Jin Park) assisté du chef de projet, Corinne Plazanet, pour les développements géoinformatiques. Par le biais de ce travail, nous verrons que c'est également une nouvelle représentation de la métropole que nous proposons.

LA DÉTECTION DES GROUPES

Pour la phase de détection des groupes, nous avons ajouté au schéma conceptuel des données les classes de liens entre bâtiments, qui eux-mêmes permettent de déterminer la classe des groupes, puis des systèmes dans un deuxième temps. Le diagramme UML ci-dessous précise ces notions.

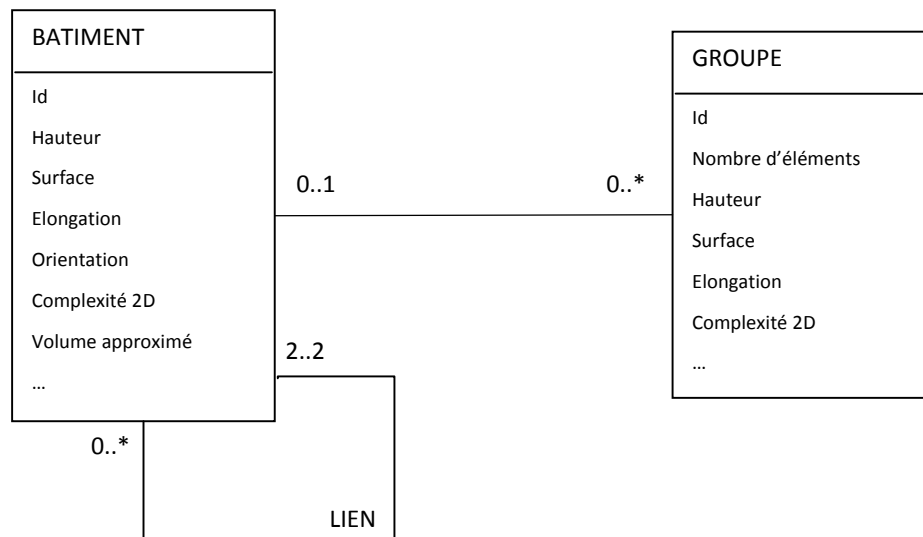


Figure 20 : Schéma UML concernant les groupes et les liens entre bâtiments.

MÉTHODOLOGIE

La méthode de détection des groupes d'habitats que nous avons établie s'articule autour du regroupement selon des critères de programmation, de proximité et de forme des bâtiments. Elle comprend les 3 étapes suivantes :

1. Calcul des descripteurs de formes de chaque bâtiment

- a. Sélection des bâtiments d'habitat de même type programmatique : soit 111 (villa), 112 (habitat moyen densité) ou 113 (habitat forte densité)

- b. Filtrage de la géométrie de chaque bâtiment pour éliminer les détails dus à la numérisation (seuil = 1 mètre)
- c. Calcul des descripteurs de forme de chaque bâtiment (se reporter à la page 64-65 pour plus de détails) :
 - complexité 2D: nombre de points formant le contour
 - surface
 - orientation
 - élongation : rapport longueur / largeur de l'enveloppe convexe
 - volume : surface x hauteur

2. Détection des liens de chaque bâtiment à ses voisins

- a. Calcul des centroïdes de chaque bâtiment à partir de sa géométrie
- b. Recherche des centroïdes de bâtiments voisins dans un buffer dont le diamètre est fonction de la hauteur du bâtiment et de la densité de la commune sur laquelle il est situé :

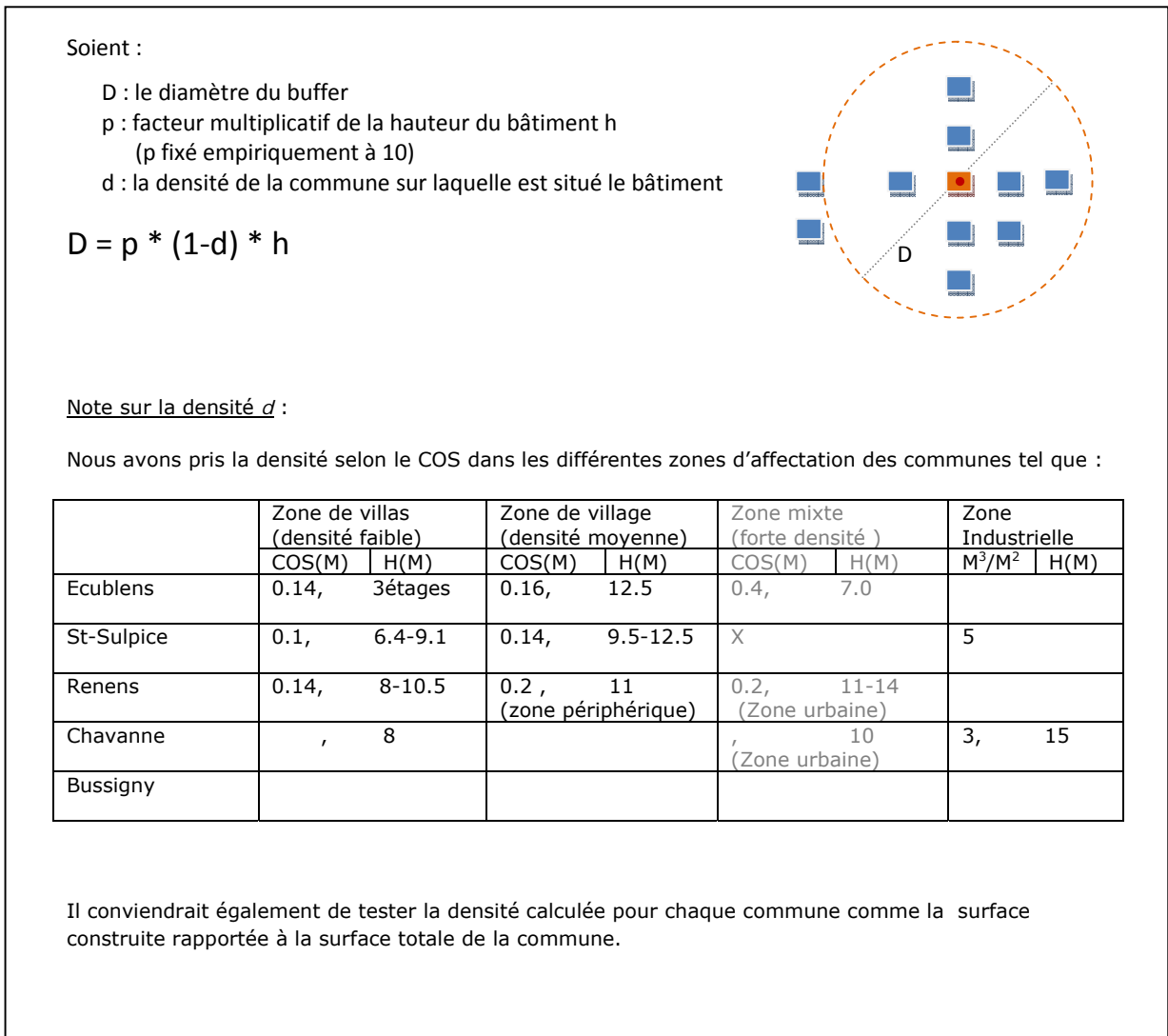


Figure 21 : Calcul du diamètre du buffer pour la détection des groupes d'habitat

- c. Pour chacun des centroïdes trouvés dans le buffer, vérification de la similarité avec chaque bâtiment selon son descripteur de forme :

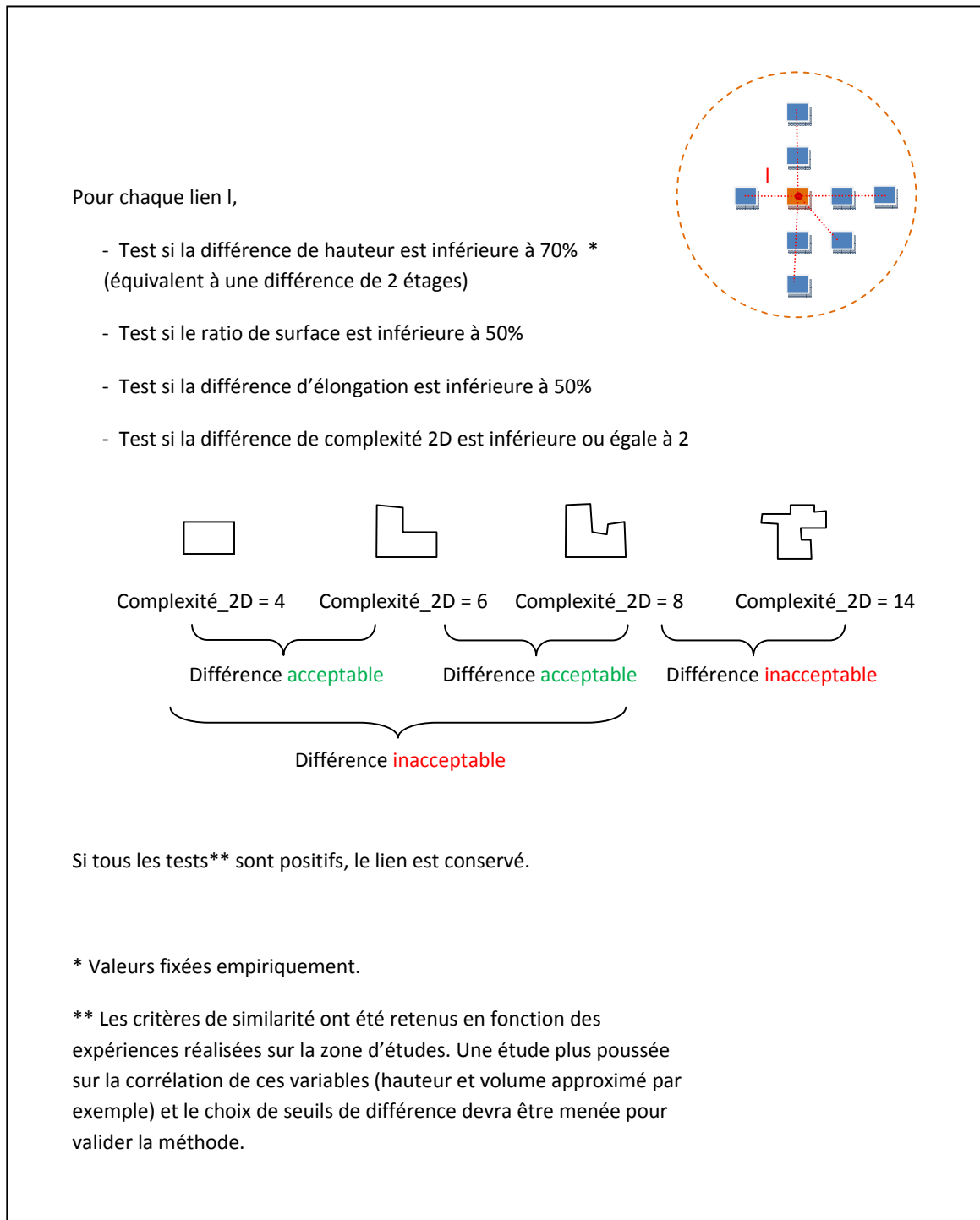


Figure 22 : Validation des liens entre bâtiments selon les descripteurs de forme

- d. Stockage des liens conservés dans la table des liens
- e. Suppression des liens traversant des routes importantes

3. Création des groupes en fonction des liens détectés

- a. Création des groupes en fonction des liens détectés
- b. Instanciation de la table des groupes
- c. Suppression des groupes dont au moins un des bâtiments le composant appartient déjà à un groupe
- d. Mise à jour du nombre d'élément de chaque groupe
- e. Calcul de la géométrie de chaque groupe. Nous avons choisi une géométrie ponctuelle correspondant au barycentre de l'ensemble des centroides des bâtiments composant chaque groupe, dans la mesure où le point nous suffit à repérer l'agent groupe et à le situer dans un système urbain à l'échelle meso.

4. Recherche des agencements spatiaux dans les groupes (qualification) en fonction des angles formés par les liens

- a. Calcul de la moyenne des angles formés par les liens composant chaque groupe
- b. Test de l'angle moyen pour déterminer l'agencement spatial du groupe : LIGNE, TRIANGLE ou CARRE

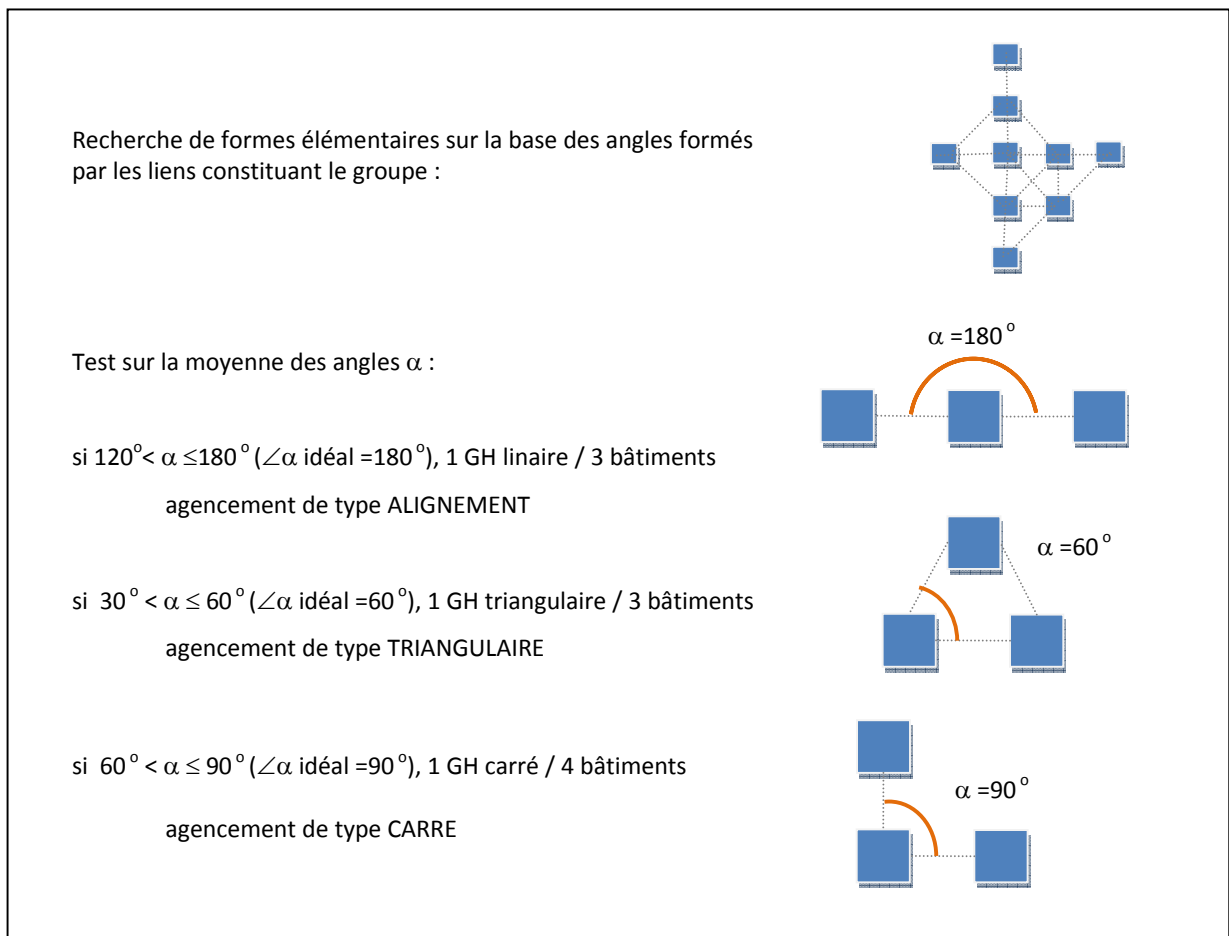


Figure 23 : Qualification des groupes en fonction des angles

Ce dernier point n'a pas été poussé plus avant à ce stade. Pour ce faire, il faudrait mettre en place une solution pertinente afin de ne conserver que les liens pertinents tels que ceux de la figure ci-dessous pour l'exemple présenté (en pointillés orange). Ce point pourrait faire l'objet d'une recherche plus approfondie, dans la mesure où il s'avère important pour l'optimisation de la localisation des programmes.

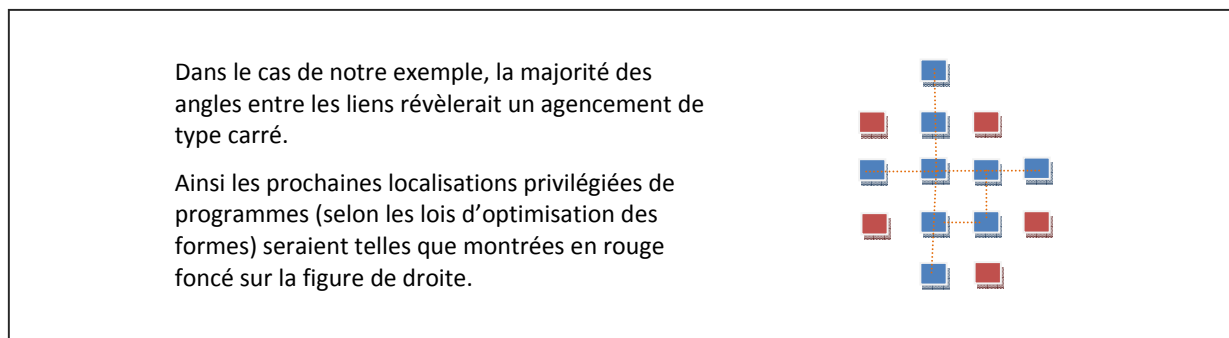


Figure 24 : Optimisation des formes à partir de la qualification des groupes d'habitats

RÉSULTATS

Nous avons testé la méthode de détection des groupes développée sur notre zone d'étude. Puis nous avons comparé les résultats obtenus avec les groupes extraits visuellement. Il en résulte des différences, principalement sur les liens obtenus.

Les figures ci-après présentent des extraits des résultats obtenus sur notre zone d'étude.

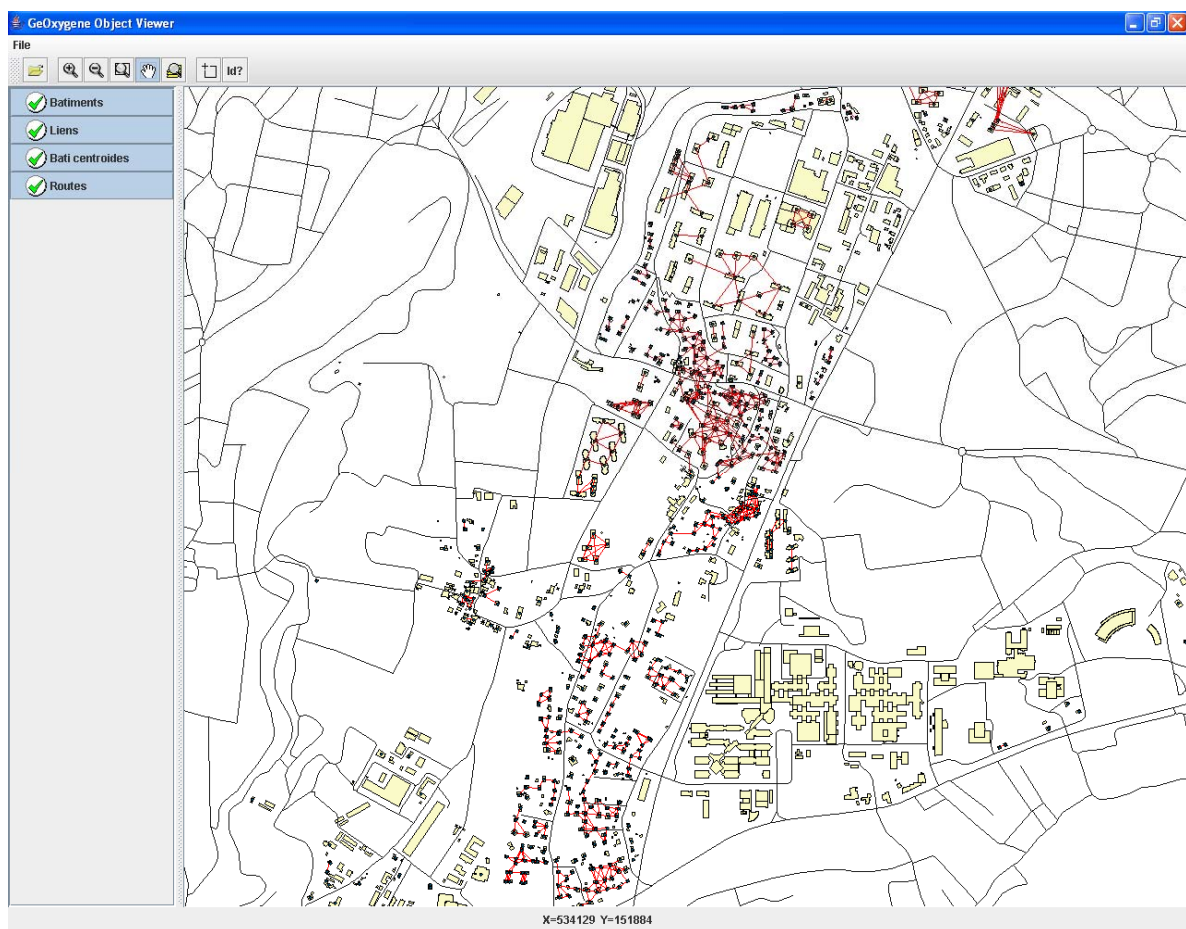


Figure 25 : Résultat de la détection des groupes d'habitat moyenne densité sur la zone d'étude

La figure ci-dessous montre différents groupes détectés sur la zone d'étude. Les résultats, bien que satisfaisants dans une première approche, présentent un certain nombre de points à améliorer :

- ✓ Dans l'extrait 1 à gauche, on peut reconnaître un alignement de logements correctement détecté. Cependant, du fait que les liens sont retenus sur la base d'une similarité de forme des bâtiments 2 à 2, le résultat montre un groupe inhomogène du point de vue de la complexité 2D des formes. En effet, le bâtiment du haut de la figure a une complexité de 10 points, alors que les autres ont une valeur de complexité de 4 ou 6 points.
- ✓ L'extrait 2 montre un groupe de bâtiments de complexité homogène. Cependant il est difficile de dire a priori si leur agencement est de type triangle ou ligne.
- ✓ L'extrait 3 comporte des liens doublés du fait de la présence de bâtiments contigus. Il conviendra soit d'agréger ce type de bâtiments pour la phase de détection des liens, soit de les considérer comme un type de bâtiment de forme particulière. Ce point reste également à approfondir.
- ✓ Dans l'extrait 4 à droite de la figure, on peut reconnaître un agencement de type carré. Cependant on constate que certains liens (liens en diagonal surlignés en bleu dans la figure) ne sont pas pertinents, comme évoqué en page 97 de ce document : d'une part, ils faussent les calculs d'angularité dans les groupes et d'autre part, ils perturbent la représentation de la ville à l'échelle meso. La solution, encore à définir, pourrait consister à supprimer les liens se croisant.

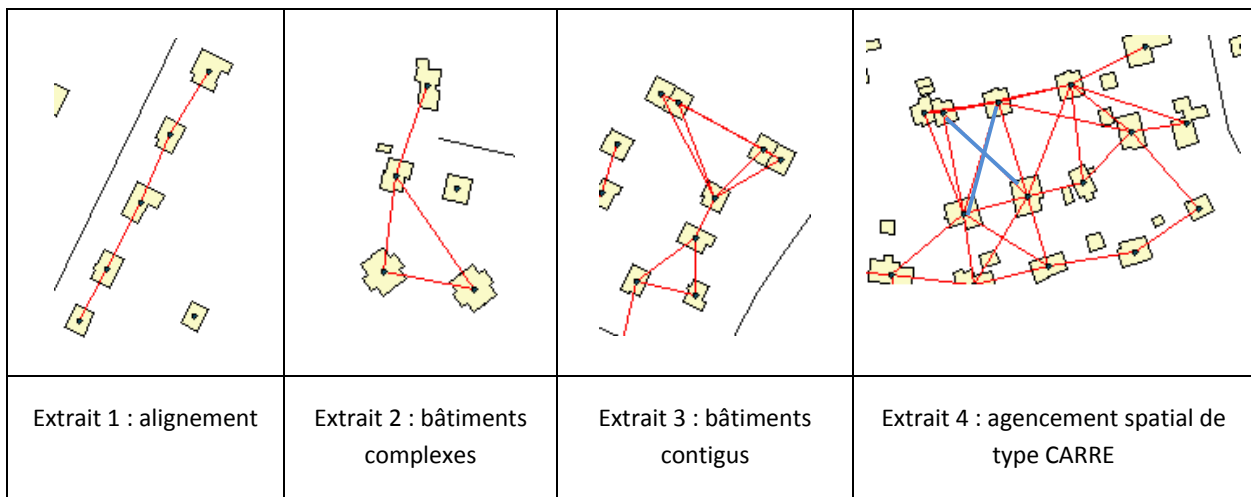


Figure 26 : Zoom sur le résultat de différents groupes détectés

Enfin la figure 27 ci-dessous montre le résultat la nouvelle représentation de la ville à l'échelle meso, basée sur les groupes de logements liés aux équipements et aux espaces publics.

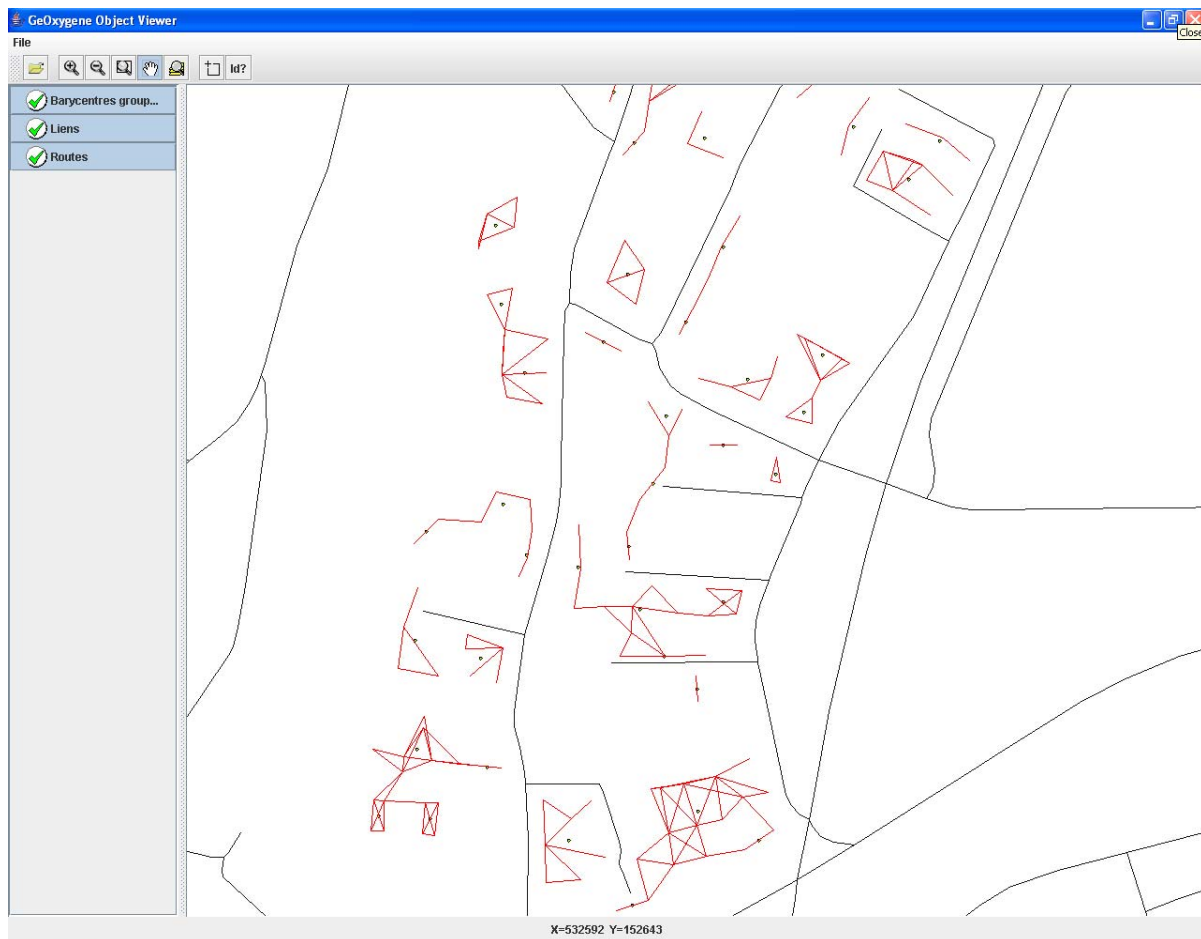


Figure 27 : Résultat de la représentation simplifiée des groupes d'habitat avec leur barycentre

DETECTION DES SYSTEMES URBAINS

Rappelons qu'un système urbain, selon le travail de doctorat de Jong-Jin Park, est défini comme un regroupement de :

- ✓ au moins un espace public EP (rue, place ou parc),
- ✓ au moins un équipement collectif (école, administration, etc.) ou d'activité économique groupé (bureaux, commerces, etc.) E
- ✓ et au moins un groupe d'habitat GH.

Il conviendra d'ajouter ces classes au schéma conceptuel des données.

Nous n'avons pas eu l'opportunité d'aborder l'implémentation de la détection des systèmes urbains. Nous l'évoquons cependant brièvement ici sur un plan théorique.

METHODOLOGIE

Espace public

La première difficulté réside dans la détermination d'une méthode de qualification de l'**espace public**. Il s'avère complexe de déterminer si une rue, un parc ou une place en particulier est susceptible d'être qualifié d'espace public, dans la mesure où cette notion repose sur l'activité humaine, et que nous n'avons pas cette donnée dans le cadre de notre projet.

Une méthode pour qualifier d'espace public EP une rue ou une place pourrait consister à :

1. déterminer, parmi l'ensemble des tronçons de rues du réseau routier, les tronçons qui ont le plus d'équipements à proximité (dans un buffer de 10 mètre par ex.)
2. rechercher si les tronçons connectés à chaque tronçon candidat ont également un grand nombre de services à proximité
3. si c'est le cas, le nœud routier pourrait être considéré comme une place EP potentielle. Si non, le tronçon est lui-même une rue EP potentielle

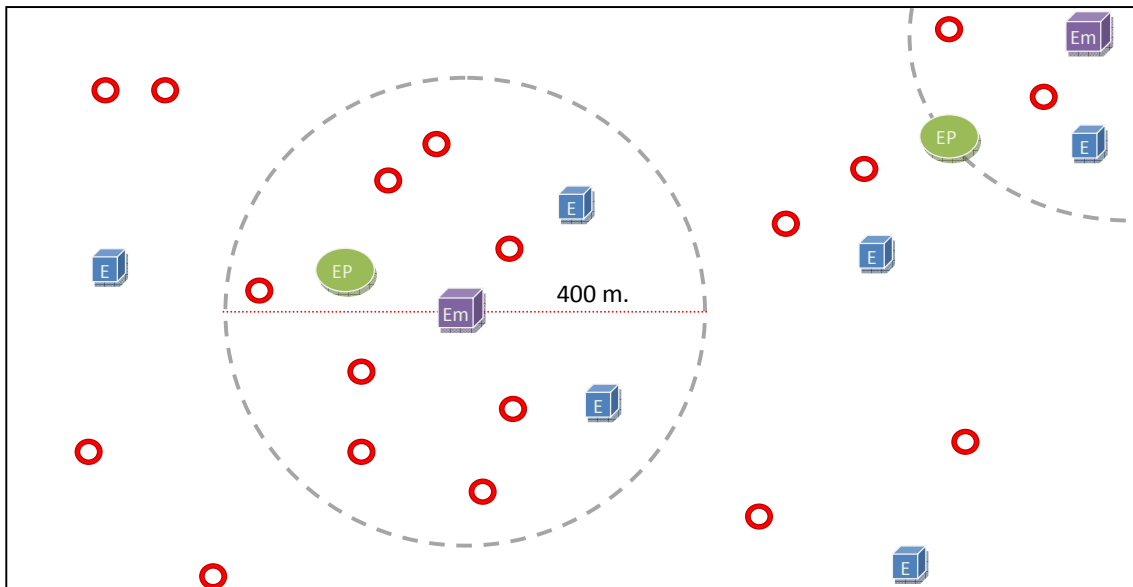
Centre de gravité

Cependant, vu la difficulté de définir la notion d'EP, nous avons envisagé une autre alternative qui est d'initier la phase de détection des systèmes urbains par la recherche de leur **centre de gravité** potentiel.

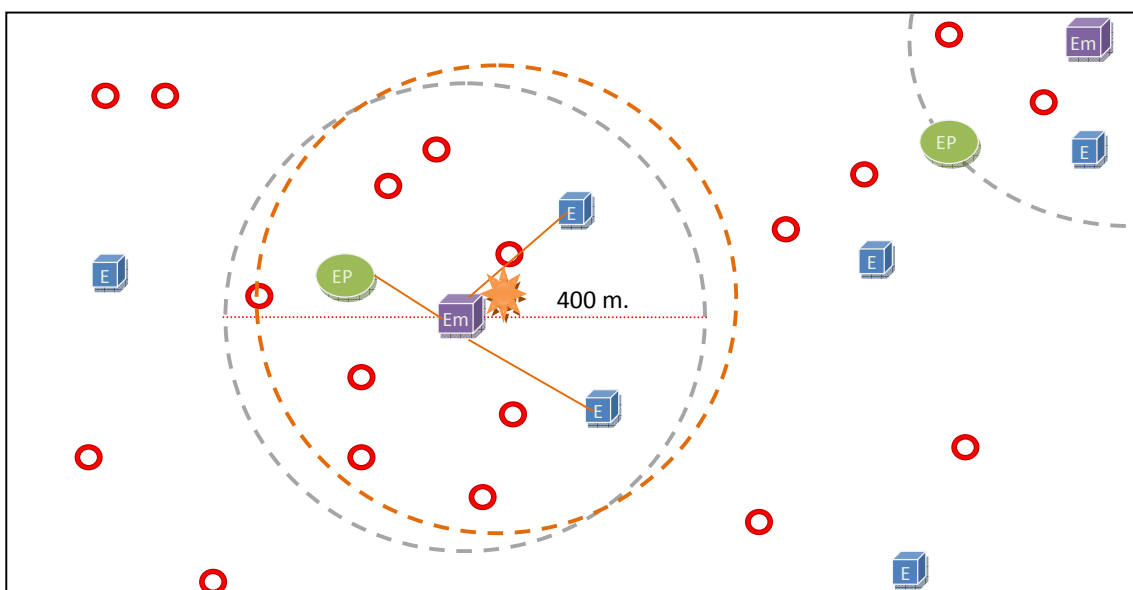
Un système urbain a, en principe, un rayon d'influence de 400m depuis le centre de gravité de manière à ce que chaque habitant de ce système, soit chaque GH, puisse avoir un lien privilégié avec les espaces publics EP, ou les équipements, soit accessible à une distance maximale de 800m depuis chez eux.

Ainsi nous avons envisagé une autre alternative pour initier les détection des systèmes qui commence par détecter les centres de gravité. Il s'agit d'une première ébauche à approfondir. L'idée est la suivante :

1. Pour chaque équipement majeur E_m : église, hôtel de ville, école ou gare, considéré comme centre de gravité potentiel, recherche d'autres équipements dans un rayon de 400 mètres à partir de chaque équipement majeur



2. Si au moins un espace public EP, un équipement E, et un groupe d'habitat GH, un système urbain est créé
3. Le centre de gravité du système détecté est recalculé par rapport à l'ensemble de ces points E, EP et G



QUALIFICATION DES SYSTÈMES

Une fois les systèmes détectés, nous envisageons la possibilité de les qualifier leur satisfaction, tels que selon les règles suivantes :

- ✓ Selon le nombre d'espace public EP (parc ou place) présents dans le système :
 - Si le nombre d'EP est supérieur ou égal à 2, alors le système est satisfait
 - Si le nombre d'EP est de 1, alors le système est suffisant
- ✓ Selon le nombre d'équipements présents dans le système :
 - Si le nombre d'E est supérieur ou égal à 2, alors le système est satisfait
 - Si le nombre d'E est de 1, alors le système est suffisant
- ✓ Selon la qualité des équipements (services/nuisances) présents dans le système :
 - Si une majorité d'équipements présents sont des attracteurs (services), alors le système est satisfait
 - Si une majorité d'équipements présents sont des répulseurs (nuisances), alors le système est insatisfait
- ✓ Selon la qualité des équipements (mixité des programmes) présents dans le système :
 - Si une majorité d'équipements présents hébergent plusieurs programmes(mixtes), alors le système est satisfait
 - Si une majorité d'équipements présents sont mono fonctionnels, alors le système est insatisfait

La liste de ces règles pourrait être étendue selon la proximité moyenne des groupes d'habitat à l'espace public, ou encore la connectivité aux équipements, etc.

Ou encore, on suppose que la présence de la nature dans la proximité de l'ensemble pourrait effectivement rendre la valeur beaucoup plus favorable dans la ville contemporaine.

7 Le moteur de simulation Multi-Agent

LES SYSTEMES MULTI-AGENTS (SMA)

Apparus aux États-Unis à la fin des années 1970, les systèmes multi-agents ont connu un essor important au niveau mondial qui n'a pas encore été démenti. L'une des grandes sources d'inspiration pour les systèmes multi-agents a été l'étude des comportements sociaux de certaines familles d'insectes. L'exemple simple est celui des fourmis (*SWARM systems*): Chaque fourmi a pour but de se déplacer dans la fourmilière. A chaque fois elle rencontre de la nourriture, elle la prend sur son dos. A chaque charge, elle laisse en place la précédente et charge celle qu'elle croise. Ce qui est étonnant, c'est qu'une fourmi toute seule agit ainsi. Mais 100 fourmis font des tas de nourriture. Elles rangent! C'est un comportement qui n'a pourtant pas été programmé, un comportement émergent. Elles ne connaissaient pas la notion de tas, elles l'ont inventé collectivement !

Les lois explicitées dans le cadre du projet sont prises en compte dans le degré de satisfaction des agents. Chaque agent a ses propres désirs et tente de maximaliser son degré de satisfaction par rapport à ses désirs. Par exemple une villa sera « contente » si elle se crée à proximité d'une école, etc. Le principe de calcul du degré de satisfaction est basé sur le modèle gravitaire de Newton largement utilisé en géographie. Il prend en compte la distance, le type d'influence subie (service ou nuisances) ainsi qu'un coefficient d'influence qui sert à pondérer le type d'influence.

Les Systèmes Multi Agents (S.M.A.) sont un sous domaine de l'Intelligence Artificielle qui intègrent les modèles Orientés Objets, les automates Cellulaires, la gestion d'entités hétérogènes (héritage¹⁴ et polymorphisme¹⁵), l'intégration de plusieurs modèles et la prise en compte de différents niveaux d'analyse.

Un SMA peut être défini comme un réseau d'agents solveurs de problèmes, autonomes et réactifs (comportements face à des événements), coopérant pour résoudre un problème global complexe en résolvant chacun un problème particulier par rapport à son but. Chaque composant n'évolue pas seul, mais co-évolue dans le système avec les autres.

L'architecture d'un SMA est basée sur les éléments suivants :

- Les agents doivent être dotés de systèmes de décisions et de planification à plusieurs.

¹⁴ Héritage : Mécanisme par lequel une classe « fille » a les mêmes caractéristiques que sa « mère ». Exemple : la classe des Voitures aura les caractéristiques de celle des Véhicules (avec en plus ce qui fait qu'une Twingo n'est pas, mais alors pas du tout, une navette spatiale). En anglais, inheritance. (définition provenant du dictionnaire informatique <http://www.linux-france.org/>)

¹⁵ Polymorphisme : Mécanisme selon lequel un même message peut être envoyé vers des objets de types différents (classes), chaque objet réagissant de façon originale (D'après Philip Monnier). Voir aussi polymorphe. (définition provenant du dictionnaire informatique <http://www.linux-france.org/>)

- L'agent (individu d'une société multi agents) dispose d'un modèle cognitif qui lui permet de mettre en œuvre les actions qui répondent au mieux à ses objectifs. Cette capacité à la décision est liée à un "état mental" qui reflète les perceptions, les représentations, les croyances et un certain nombre de paramètres "psychiques" (désirs, tendances...) de l'agent.
- Les agents doivent être dotés d'un système de communication.
- Les agents doivent être capables de s'adapter à leur environnement en mutant.

Parmi les différentes définitions d'un système multi-agents, nous citerons celle de [Ferber, 1997] qui le définit comme un système composé des éléments suivants :

- Un environnement E, dans notre cas, la métropole
- Un ensemble d'objets O. Ces objets sont situés, c'est-à-dire que tout objet est localisé dans E. Ces objets sont passifs, c'est-à-dire qu'ils peuvent être perçus, créés, détruits et modifiés par les agents.
- Un ensemble A d'agents qui sont des objets particuliers, lesquels représentent les entités actives du système.
- Un ensemble de relations R qui unissent des objets (et donc des agents) entre eux.
- Un ensemble d'opérations permettant aux agents de A de percevoir, produire, transformer, et manipuler des objets de O. Cela correspond à la capacité des agents de percevoir leur environnement, et de se modifier si nécessaire.
- Des opérateurs chargés de représenter l'application de ces opérations et la réaction du monde à cette tentative de modification, que l'on appellera les lois de l'univers.

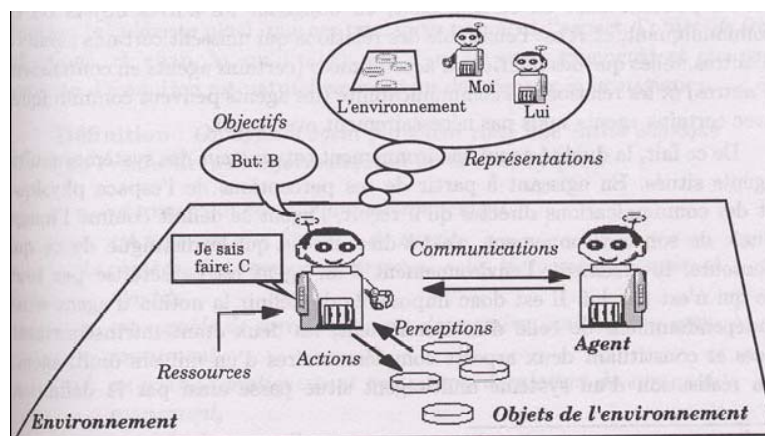


Figure 28 : Représentation imagée d'un agent en interaction avec son environnement [Ferber, 1997]

L'objectif du système est d'évoluer vers la meilleure qualité possible. Cela passe par une localisation optimale et une optimisation des éléments déjà en place. Chaque agent, quelque soit son niveau, a donc pour objectif d'être le plus satisfait possible. Nous introduisons la notion de **degré de satisfaction**.

Certains objets de notre modèle conceptuel des données (MCD) sont des agents. Un bâtiment, si celui-ci n'a qu'une seule fonction, est un agent. S'il en a plusieurs ou s'il s'agit d'un programme, il y a alors **un agent par fonction** : par exemple, l'agent *boutique* qui se trouve dans l'agent *centre commercial*.

Un *programme* est un agent. Nous pourrions ajouter l'agent *Route* par exemple. Ceci est encore à définir.

Chaque agent a :

- ✓ Un ensemble de données sur l'environnement,
- ✓ Un ensemble d'évènements auxquels il pourra répondre,
- ✓ Un ensemble d'objectifs qu'il souhaite atteindre,
- ✓ Un ensemble de plans qui décrivent la façon d'atteindre ses différents objectifs.

Chaque agent a pour but de conserver et si possible d'augmenter son degré de satisfaction. Au niveau local, chaque agent (école, commerce, usine, villa, rivière, quartier, commune, etc.) a la capacité d'agir / réagir en fonction de son but. Par ex. la villa veut avoir une vue dégagée, être près d'une école, loin d'une nuisance telle qu'une usine, dans un quartier qui corresponde à son identité, etc. Ainsi dès qu'une usine s'installe près d'une zone villa, les degrés de satisfaction du quartier chutent fortement et engendrent une forte probabilité de disparition des villas au profit de nouvelles usines.

Au niveau du quartier (meso), chacun souhaite également offrir la meilleure satisfaction (le plus homogène possible, avec une identité propre que reflète chaque bâtiment, etc.) et doit pouvoir « pousser » les objets micro ne lui correspondant pas au profit de la formation de nouveaux objets mieux adaptés. *"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], p.154.

L'objectif global du système au niveau macro est également d'augmenter son degré de satisfaction.

ANALYSE CONCEPTUELLE

Les modèles multi-agents offrent un moyen de simuler des phénomènes collectifs. Ils permettent de mettre en relation des causes et des effets définis à des niveaux différents. Au niveau local sont exprimés les comportements des individus. Au niveau global, c'est le comportement de la société qui est observé.

L'analyse conceptuelle est une phase de spécifications qui permet d'aboutir au schéma global de l'architecture du système. Il s'agit de définir les composants du système : l'identité des agents et leurs comportements. La conception de l'architecture du SMA est en cours. Ce travail est réalisé dans le cadre du doctorat de Vitor Silva.

L'agent a des connaissances sur lui-même, et ses interactions avec ses voisins. Il sait alors prendre une décision le concernant (il est autonome). Les agents communiquent entre eux (s'envoient des messages). Ils se regroupent pour prendre des décisions de groupes qui réduisent les efforts individuels (généralisation).

Il s'agit d'enrichir notre schéma conceptuel des données des états décrivant les agents et de leurs comportements.

Dans notre schéma conceptuel multi-échelle de modélisation de la métropole, nous considérons les agents cognitifs suivants :

- ⇒ au niveau *micro* : *bâtiments*
- ⇒ au niveau *méso* : *groupes (micro systèmes) et systèmes urbains qualifiés*
- ⇒ au niveau *macro* : la *ville* elle-même et ses organes décisionnels

Les autres éléments constituent les objets de l'environnement naturel (lacs, rivières, forêts et espaces verts) et construit (infrastructures routières, ferroviaires et transports publics) des agents.

Au niveau local, chaque agent (école, commerce, usine, villa, rivière, commune, etc.) a la capacité d'agir / réagir en fonction de son but. Par ex. la villa veut avoir une vue dégagée, être près d'une école, loin d'une nuisance telle qu'une usine, dans un quartier qui corresponde à son identité, etc. Ainsi dès qu'une usine s'installe près d'une zone villa, les degrés de satisfaction du quartier chutent fortement et engendrent une forte probabilité de disparition des villas au profit de nouvelles usines.

Au niveau des groupes et systèmes, chacun souhaite également offrir la meilleure satisfaction et doit pouvoir « pousser » les agents micro ne lui correspondant pas au profit de la formation de nouveaux agents mieux adaptés. *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, p.154].

L'objectif global du système au niveau macro est également d'augmenter son degré de satisfaction.

LES AGENTS VECTEUR ET LEUR COMPORTEMENT

Dans l'état actuel de la recherche, les entités que l'on considère comme des agents dans notre système multi-agents sont :

- ✓ les bâtiments,
- ✓ la commune,
- ✓ et les systèmes urbains.

Le schéma conceptuel des données UML complet des classes de notre système multi-agents est repris à la figure ci-après avec la notion d'agent.

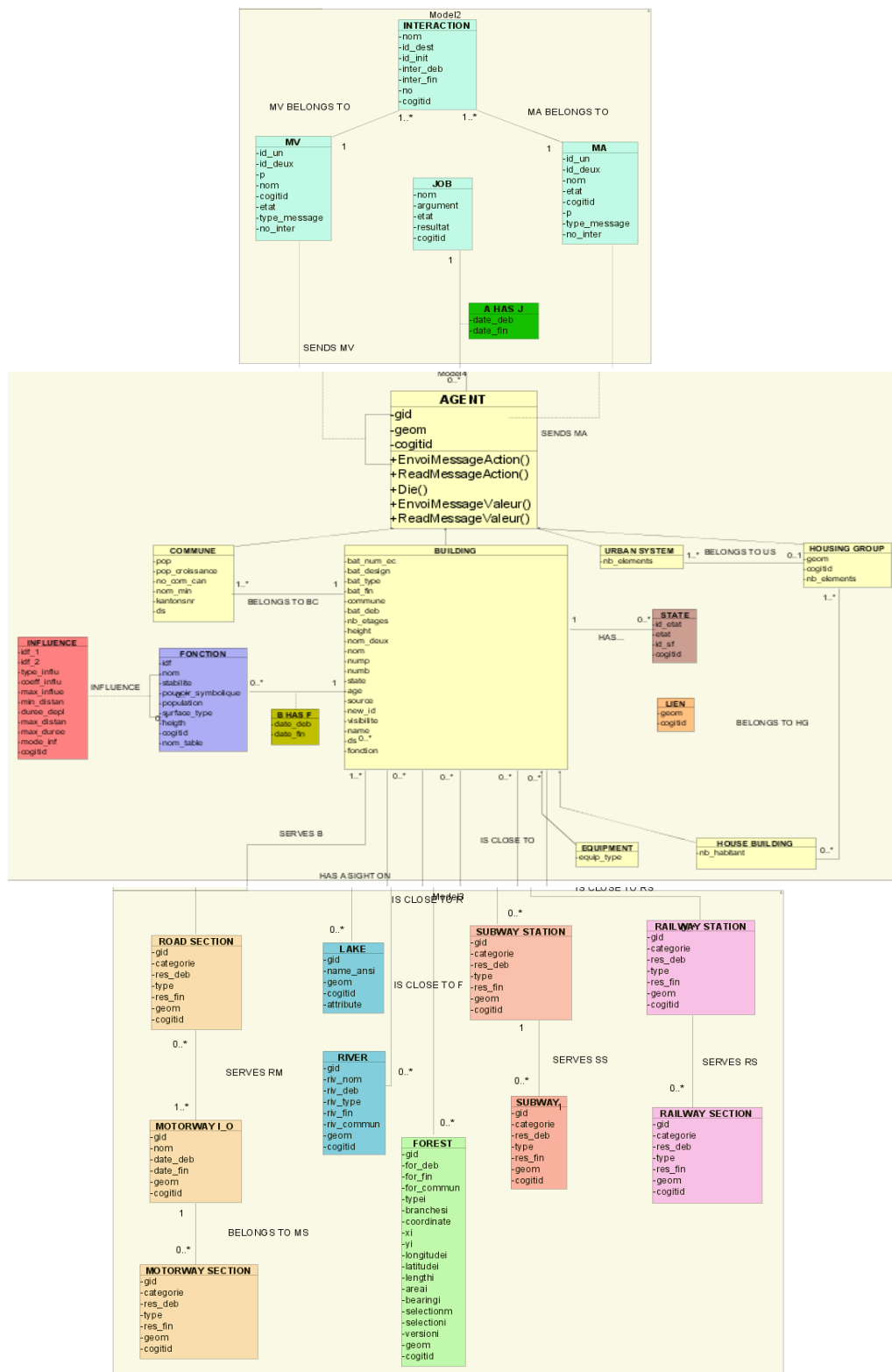


Figure 29 : Vue complète du schéma conceptuel UML

Notre système est composé des classes suivantes :

La classe Agent détient la capacité cognitive du système dans le sens où elle représente un agent qui est capable de percevoir son environnement et de prendre des décisions pour satisfaire ses objectifs et est à ce titre considérée comme représentant un agent. Cette classe se spécialise en trois classes différentes : Building, Commune et Urban System Agent.

L'agent *Building* représente simplement un bâtiment, la classe Commune la commune dans laquelle se trouve le bâtiment et la classe Urban System Agent représente un système urbain.

La classe Building se spécialise à son tour en les classes House Building (représentant un bâtiment de logement) et Equipement (représentant un bâtiment de type équipement).

Les autres classes représentent soit des objets de l'environnement soit d'autres éléments du SMA implémenté.

Les classes représentant les agents dans le système sont les suivantes :

- Agent : La classe Agent détient la capacité cognitive du système dans le sens où elle représente un agent qui est capable de percevoir son environnement et de prendre des décisions pour satisfaire ses objectifs et est à ce titre considérée comme représentant un agent. Cette classe se spécialise en trois classes différentes qui correspondent à trois agents différents : Building représentant les bâtiments, Commune représentant la Commune, Urban System représentant le système urbain. La classe Agent a la capacité de gérer une communication avec les autres agents par le biais de ses différentes classes (cf. plus bas).
- Building : Cette classe représente tous les bâtiments du système. Elle représente un agent micro. Les agents les plus nombreux dans notre système sont de ce type. Ces bâtiments sont caractérisés par une hauteur, un nombre d'étages, un âge, une fonction, une visibilité sur le lac, etc. Ils ont aussi un attribut appelé Degré de Satisfaction qui est mis à jour de manière périodique. La classe Building se spécialise à son tour en les classes House Building (représentant un bâtiment de logement) et Equipement (représentant un bâtiment de type équipement).
- Housing Group : Cette classe est un agent qui représente des groupes de bâtiments de type habitation. C'est un agent micro.
- Urban System : Cette classe représente un système urbain (cf. ??). C'est un agent méso qui se compose d'agents micro. La commune est généralement composée de systèmes urbains.
- Commune : Cette classe représente un agent macro. C'est un agent qui est composé d'agents micro et méso.

Les classes représentant les objets de l'environnement naturel sont :

- Forest : classe représentant les forêts.
- Lake : classe représentant les lacs.
- River : classe représentant les rivières.

Les classes représentant les réseaux sont :

- Railway section : classe représentant les tronçons de voie ferrée.
- Railway station : classe représentant les stations de voie ferrée.
- Subway : classe représentant les tronçons de métro.
- Subway station : classe représentant les stations de métro.
- Motorway section : classe représentant les tronçons d'autoroute.
- Motorway I_O : classe représentant les entrées et les sorties d'autoroute.
- Road Section : classe représentant les tronçons de route.

La classe Fonction représente les différentes fonctions qui peuvent être affectées à un bâtiment. Un bâtiment peut changer de fonction au cours de son existence.

La classe Influence contient la valeur des influences entre les diverses fonctions.

Les classes représentant l'interaction sont:

- Interaction : classe représentant une interaction. Chaque fois qu'une interaction est initialisée entre un agent et un autre une instance de la classe Interaction est créée.
- MV (Message Valeur) : classe représentant les messages de type valeur. Ce type de message représente une valeur de paramètre qui est échangée.
- MA (Message Action) : classe représentant les messages de type action.
Ce type de message représente une action qui est demandée.
- Job: classe représentant les tâches à effectuer par un agent.

LE MODÈLE DE COMMUNICATION

Un agent étant une entité indépendante dont la structure est connue de lui seul, il ne peut pas agir directement sur un autre agent. Le message est l'unique moyen de communiquer entre les agents. Il s'agit d'établir le diagramme des interactions entre agents, puis les schémas détaillant les scénarios de chacune de ces interactions. Les agents peuvent avoir différentes règles décisionnelles et les activer selon des seuils différents.

Les tests de variantes du modèle de communication et de négociation entre agents (hiérarchique / horizontal, altruiste /égoïste, etc.) permettront de mieux comprendre la dynamique de la ville.

DESCRIPTION DE L'INTERACTION ENTRE LES AGENTS

Pour pouvoir fonctionner, le moteur a en particulier besoin d'un système qui permette un échange d'information entre les agents. En effet les agents ont une perception de l'environnement (i.e. les objets de l'environnement) et une perception des autres agents qui ne sont pas de même nature. Ces derniers interagissent entre eux par le biais de messages échangés. Ces processus nécessitent un certain formalisme et des protocoles. Il faut donc développer tout un ensemble de méthodes propres aux agents et des classes associées.

On désigne dorénavant par le terme « interaction » toute action qui affecte l'agent dans la réalisation de son désir.

Notre implémentation logicielle de l'interaction entre les agents sera une conception ad-hoc adaptée à notre problème car il n'existe pas de modèle de conception générique de l'interaction entre les agents. Il existe des protocoles d'interaction entre les agents tels que FIPA mais nous ne les utilisons pas étant donné leur complexité. Ces protocoles d'interaction sont la plupart du temps destinés à permettre la communication entre des agents n'ayant pas été conçus par la même personne et qui évoluent dans un environnement ouvert [1]. Dans le cadre de notre recherche on a mis au point un langage plus simple étant donné que l'on se trouve dans un environnement créé par un seul concepteur.

L'architecture des agents est de telle sorte qu'elle permet la manipulation (envoi, réception, traitement) des messages échangés entre agents.

Notre conception de l'interaction entre les agents qui est décrite ci-dessous s'inspire largement de la thèse de Cécile Duchêne [1] de l'IGN dont le thème principal est la conception d'un protocole communication entre des agents dans le cadre de la généralisation cartographique.

PRINCIPES DE COMMUNICATION ENTRE LES AGENTS

La communication entre les agents apparaît comme un moyen de gérer l'interaction définie ci-dessus. Il existe deux types de communication : directe et indirecte. La première se base sur l'envoi de messages et la seconde sur la perception de l'environnement. Dans un cas l'agent échange délibérément des messages avec d'autres agents, dans l'autre il perçoit simplement son environnement via des « capteurs ». Les fondements de la communication directe qui nous concerne ici ont des sources multiples : linguistique, psychologie cognitive, théorie des actes de langage, etc.

Quelques travaux de recherche ([3]) concernant la standardisation des protocoles de communication dans les systèmes multi-agents ont été réalisés. Un article intéressant de Y. Labrou [2] analyse notamment cet effort de standardisation.

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

LES PERFORMATIFS

Un verbe performatif est un verbe dont l'utilisation constitue un acte en soi, se confondant avec l'acte d'énonciation.

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), commissive (promettre, refuser), déclarative (déclarer, ratifier), expressive (approuver), etc...

Pour notre modèle multi-agents nous définissons 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 :

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.

SCENARIOS STANDARD

Nous définissons ici la sémantique du langage introduit ci-dessus.

En nous basant sur les performatifs présentés ci-dessus, 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.

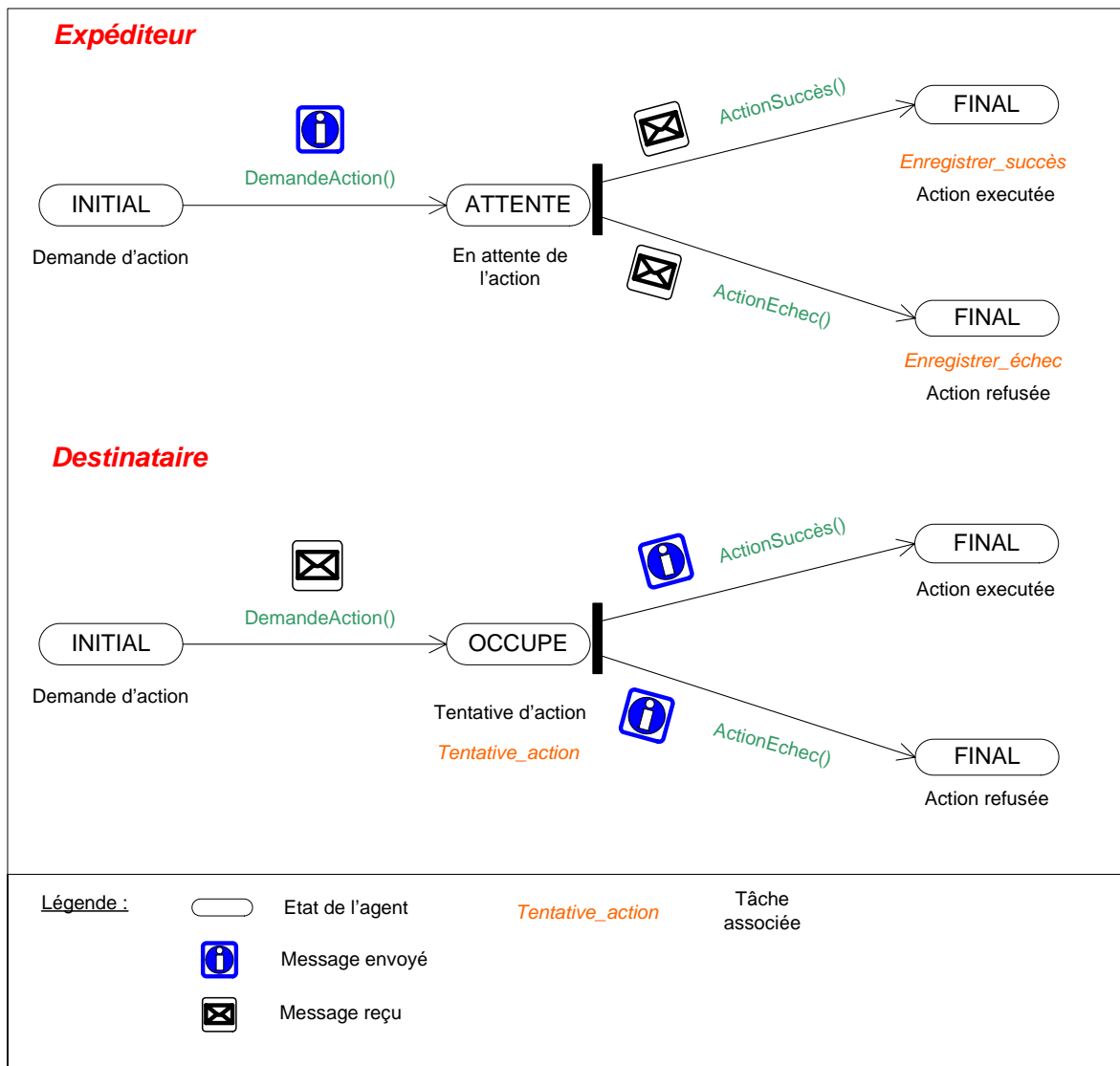


Figure 30 : Graphes de transition jumelés pour le scénario Demande d'action

- 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.

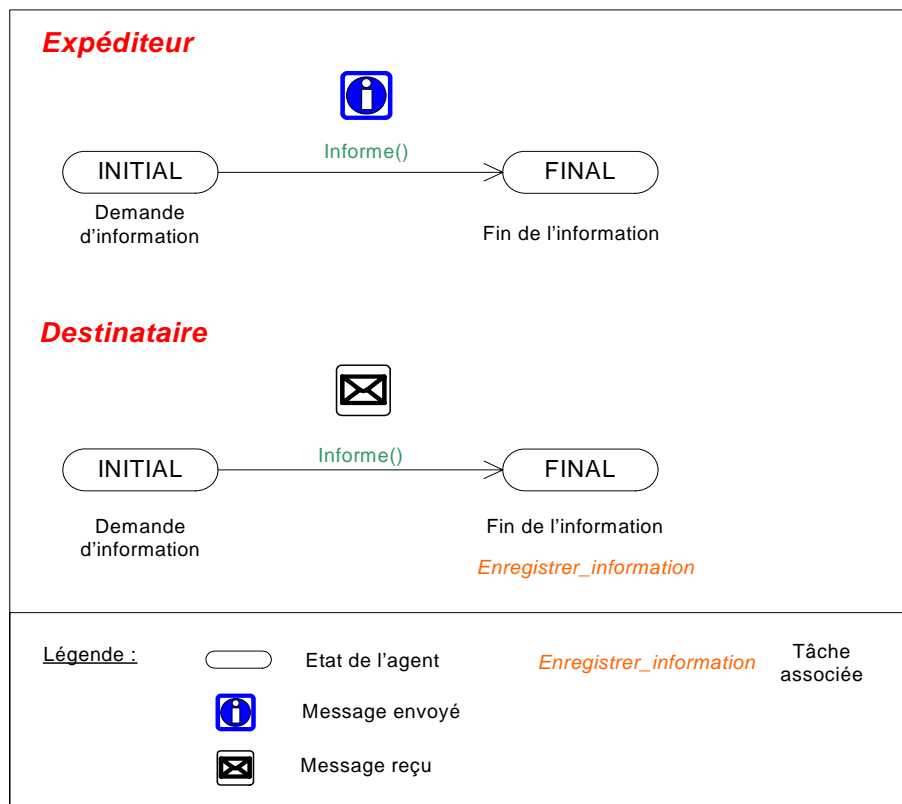


Figure 31 : Graphes de transition jumelés pour le scénario Envoi d'information

PRINCIPES DE NEGOCIATION ENTRE LES AGENTS

On décrit ici les principes très généraux de la négociation entre les agents. Les recherches sont encore en cours concernant sa formalisation.

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 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.

Il sera généralement fait appel à des graphes pour symboliser les diverses étapes d'une négociation.

SCHEMA DES CLASSES POUR LA REPRESENTATION DES SCENARIOS DE CONVERSATION

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.1. 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. Ces classes sont caractérisées par les attributs suivants :

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

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 pratiquement pour l'Agent Expéditeur à écrire dans la boîte aux lettres de l'Agent Destinataire le contenu de son message.

EXEMPLE D'INTERACTION SIMPLE

On décrit dans ce paragraphe un exemple d'interaction simple entre l'Agent Commune et l'Agent Building.

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 tout à fait égoïste mais néanmoins contrainte par l'environnement.

L'interaction entre un Agent Commune et un Agent Building peut se raconter comme une histoire :

« L'Agent Commune s'est rendu compte qu'il lui fallait des logements pour ses habitants. Une des possibilités 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 : Le voici !

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

USINE 2 : Le voici !

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

USINE n : Le voici !

COMMUNE (pour elle-même) : Bon maintenant dans tous ces DS il faut que 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 puisse construire un logement à la place ?

USINE : Attends un moment je vais réfléchir...

USINE (pour elle-même): Bon est-ce que sa demande est recevable vis-à-vis de mes contraintes ? Hum, mon DS est assez bas...mais je suis jeune encore...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 ! »

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.

L'interaction décrite ci-dessus peut se traduire par le schéma suivant :

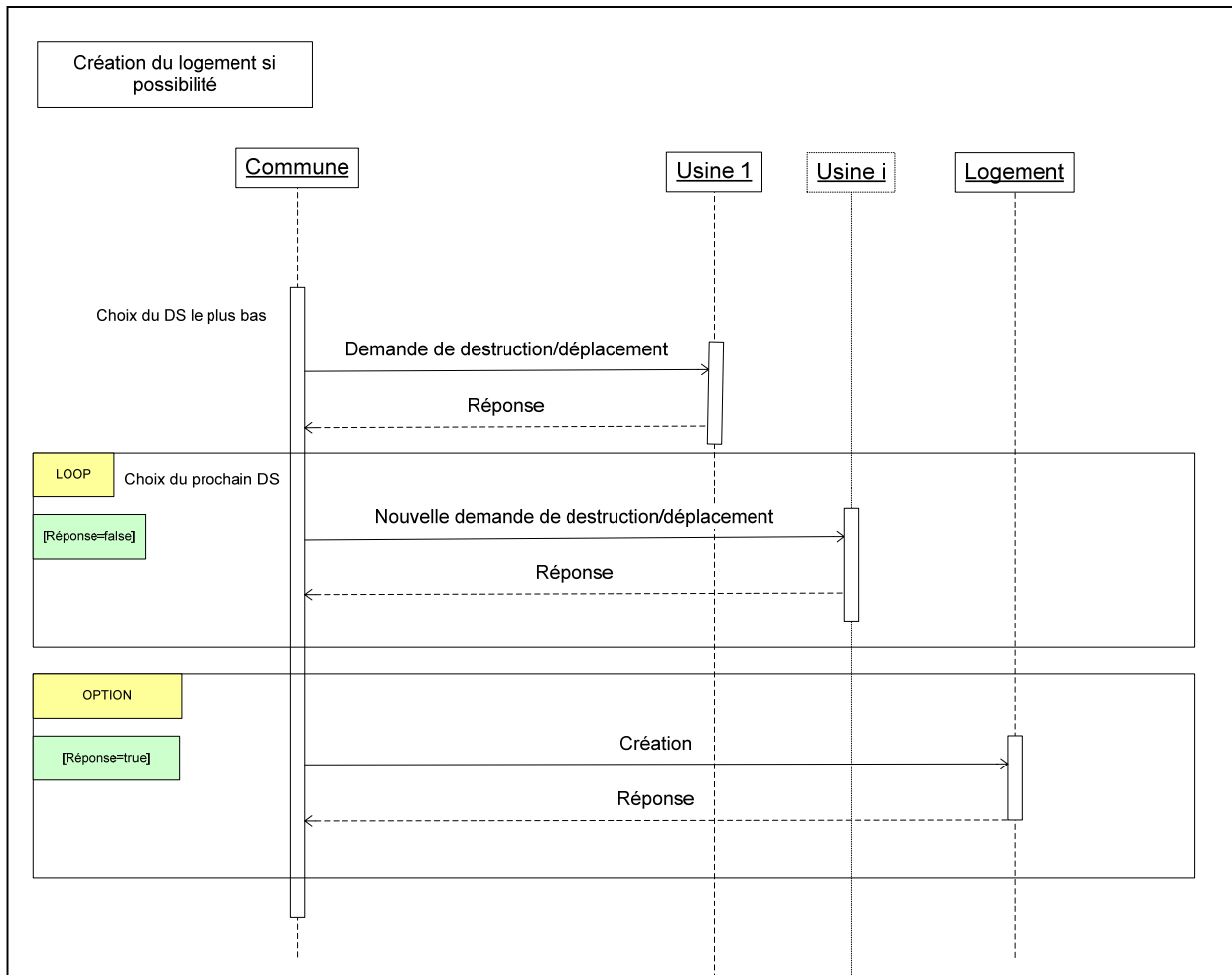


Figure 32 : Diagramme UML des séquences

LA CROISSANCE DU SYSTEME

LA CROISSANCE

Nous définissons la croissance du système comme le nombre de logements à bâtir (sachant que le nombre de services à bâtir sera induit en fonction des règles). Ainsi la formation des bâtiments se fait selon la croissance.

Il est prévu de bâtir 30'000 logements dans les 15 prochaines années dans la région Lausannoise, afin de loger 1000 personnes. Cela nous permet une estimation d'une moyenne de 300 logements à bâtir par an sur la commune de Chavannes près Renens.

La proportion de bâtiments à bâtir est d'environ :

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

Pour obtenir un nombre de logements NB à bâtir par année, sur un total de NA années (ε étant un nombre tiré aléatoirement) modulo 10% (valeur empirique), nous approximations au chiffre suivant :

$$\frac{NB}{NA} \left(1 + \frac{\varepsilon}{10}\right)$$

LA FORMATION DE SERVICES

La formation des services est liée au besoin de la population. Lorsqu'un nombre suffisant de logements s'est formé, soit un nombre suffisant de personnes qui ont besoin d'un type de service donné, alors ce type de service est créé.

Ainsi dans le modèle Agent, chaque fonction porte une valeur de population qui correspond à ce besoin : 2000 pour une école par exemple.

Règle de formation d'une école :

SI nombre d'habitants > population * (1 + nombre d'écoles) **ALORS** création d'une école

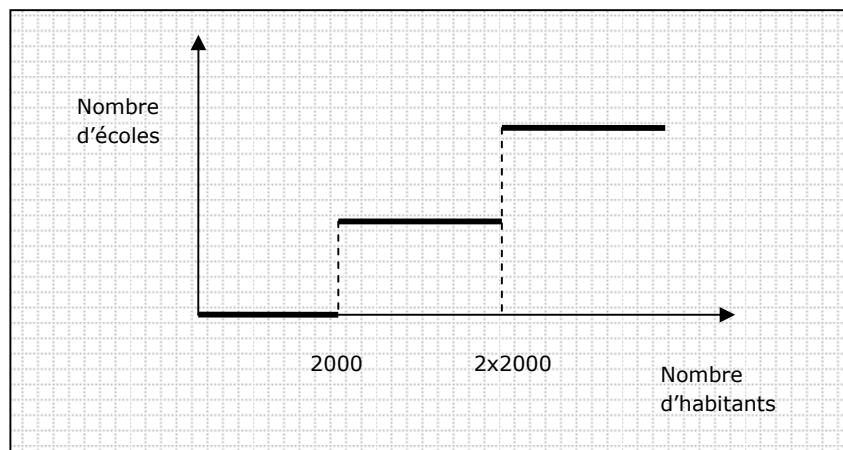


Figure 33 : Règle de formation des services. Exemple de l'école

Cette règle est identique pour chaque fonction, modulo le chiffre *population* qui diffère pour chaque fonction (voir la table des fonctions).

Outre ces règles systématiques, certains services ne sont pas liés directement à la population, mais peuvent apparaître de façon aléatoire dans une ville. C'est le cas des gares par exemple. En effet certaines villes ont une gare et d'autres n'en possèdent pas, alors qu'elles ont la même population.

L'ESPERANCE DE VIE (STABILITE)

Chaque agent a un âge et un degré de stabilité, i.e. un nombre d'années d'espérance de vie pour chaque élément de ce type. A chaque transition du processus de simulation, l'âge augmente bien évidemment de 1. Ainsi lorsque l'âge de l'agent atteint sa valeur de stabilité, il disparaît.

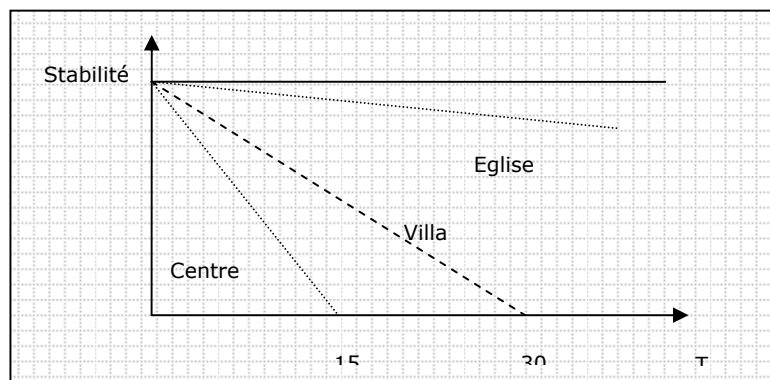


Figure 34 : Règle d'espérance de vie des agents

Règle de stabilité/instabilité : **SI** Age \geq Stabilité **ALORS** suppression de l'agent

Ainsi par exemple, pour les villas, l'instabilité est atteinte au bout de 30 ans, au bout de 15 ans pour les centres commerciaux, 10000 ans pour les églises, 100000 ans pour les lacs.

EVÈNEMENTS (PERTURBATIONS)

Enfin avant de présenter la modélisation des lois de morphogenèse et le prototype développé, nous évoquons les premiers éléments de réflexion menée sur la prise en compte d'évènements dans le système multi-agents.

Un évènement pourra être défini comme décrivant une occurrence qu'un agent doit prendre en compte pour ses actions. C'est un changement de valeur de l'un des attributs d'objet. Il peut être de type disjonctif : *arrive / n'arrive pas* selon une probabilité (loi de transition), dépendant elle-même de l'état de l'objet, voire de l'état d'autres objets.

Nous citons quelques exemples ci-dessous pour tenter de mieux comprendre le fonctionnement du système :

Apparition de services

Par exemple, lors de la formation d'un nouveau programme, le changement de valeur des distances des agents voisins à ce programme va entraîner une forte chute ou augmentation de leur degré de satisfaction. Ce pourra entraîner par exemple leur disparition, ou leur changement de fonction. Ou encore l'appel d'objets influencés positivement : c'est le cas de l'apparition d'une gare qui entraîne la construction de bâtiments de bureaux dans son entourage.

Ce type d'effets (événements) induits est déjà pris en compte dans la table des influences (voir la ligne surlignée en orange dans la table 2). L'influence de la gare sur les bâtiments de bureaux étant très forte, les bureaux à construire auront une très forte probabilité de s'installer près de la gare, puisque cette proximité aura pour effet d'augmenter fortement leur degré de satisfaction.

Les agents vont « appeler » la création des services dont ils ont besoin. Il y a une probabilité d'autant plus forte d'apparition d'un nouveau service quand le nombre d'agents logements appelant augmente. La probabilité est encore plus forte si ces agents sont regroupés au sein d'un quartier.

Mesures politiques

Certains événements sont liés à des mesures politiques et ne dépendent donc pas des agents urbains que nous avons prévus dans le modèle. Peut-être nous faudra t'il créer un agent *Politique* ?

Nous citerons les exemples suivants :

- Changement de fonction (par ex. autoroute - 211 ⇒ route - 212 avec une probabilité de 0.2, construction d'un mur antibruit sur une ligne CFF, etc.)
- Changement de type de zone d'affectation (Transformation de bosquet en forêt (probabilité 0.01) ⇒ plus d'urbanisme à 30 mètres autour)
- Augmentation du taux de croissance annuel
- Augmentation de la densité des villas à proximité des gares

Hasard

Certains événements sont totalement liés au « hasard », à la nature ou aux modes et cultures :

- Catastrophes naturelles : incendie, inondation...
- Changement de valeur d'influence : chute du coefficient d'influence des rivières pour les villas par exemple...
- Changement de pouvoir symbolique : regain d'intérêt pour la vue sur les cimetières par exemple

LA SATISFACTION DES AGENTS

La satisfaction des agents dépend de leur satisfaction par rapport à chacune des lois énoncées au chapitre 5. Parmi ces lois, nous avons implémenté les suivantes : l'influence des programmes alentour qui peuvent être soit des services, soit des nuisances pour l'agent selon sa fonction, le voisinage et la visibilité sur des éléments particuliers ou symboliques du territoire (tels que par exemple le lac Léman).

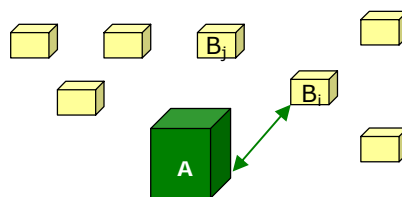
INFLUENCE FONCTIONNELLE ET VOISINAGE

Il s'agit de modéliser le degré de satisfaction de l'agent par rapport à l'influence des services et des nuisances qui l'entoure, et à son voisinage : Est-il satisfait de la proximité aux services dont il a besoin ? Est-il insatisfait parce que trop proche d'une nuisance ? Est-il satisfait par la présence de voisins de même fonction ?

Nous avons introduit le degré de satisfaction des bâtiments par rapport aux autres objets dans cette première phase du projet.

Le principe est analogue aux principes du modèle gravitaire utilisé en géographie pour déterminer l'attraction de lieux en fonction des flux migratoires de population (http://hypergeo.free.fr/article.php?id_article=76). Il s'agit de l'application d'une méthode basée sur les interactions spatiales et dont la formule s'apparente à celle du modèle de gravité de Newton qui stipulait que l'attraction entre deux corps est proportionnelle à leur masse et inversement proportionnelle à la distance qui les sépare.

Ainsi plus le bâtiment est proche d'un service, plus son degré de satisfaction est élevé. Inversement plus le bâtiment est près de la nuisance, plus sa satisfaction est faible.



De plus tous les bâtiments voisins sont séparés les uns des autres d'au moins une distance minimum que nous appellerons δ . Selon la loi d'architecture selon laquelle la distance entre voisins est égale à la hauteur des bâtiments (voir en section 3.2.3.1), le seuil de distance minimum des bâtiments à la ressource est fixé proportionnellement à la hauteur du bâtiment ressource :

$$\delta(ai) = \text{hauteur}(ai)$$

Ainsi selon la loi d'attraction (influence fonctionnelle positive), les bâtiments sont le plus proches possible de la ressource A, tout en respectant une distance seuil de voisinage avec A. La distance

optimale entre les bâtiments et la ressource (soit 100% de satisfaction) correspond donc à cette distance minimale. Au-delà la satisfaction décroît. En deçà, si le bâtiment est trop près de la ressource, le degré de satisfaction retombe à 0%.

Nous définissons une fonction de satisfaction DS (en pourcentage), tenant compte du seuil de voisinage minimum δA , comme suit :

- Soient $a_i \in [1 ; n]$ un ensemble de n agents de hauteur(a_i),
- Soit un agent $a \in a_i$
- Soit un agent a_i , un des n agents influençant l'agent a ,
- Soit Type_influence (a_i, a) : le type d'influence de l'agent a_i sur a avec **S** pour service et **N** pour nuisance
- Soit Coef_influence (a_i, a) : la valeur d'importance de l'influence de l'agent a_i sur a allant de 0 à 10 du moins au plus influent
- Soit Max_influence (a_i, a) : le rayon d'influence max en mètres de l'agent a_i sur a
- Soit $\delta(a_i)$ la distance de séparation minimum entre a_i et un agent quelconque,
- Soit DS(a, a_i) le degré de satisfaction de l'agent a par rapport à a_i ,

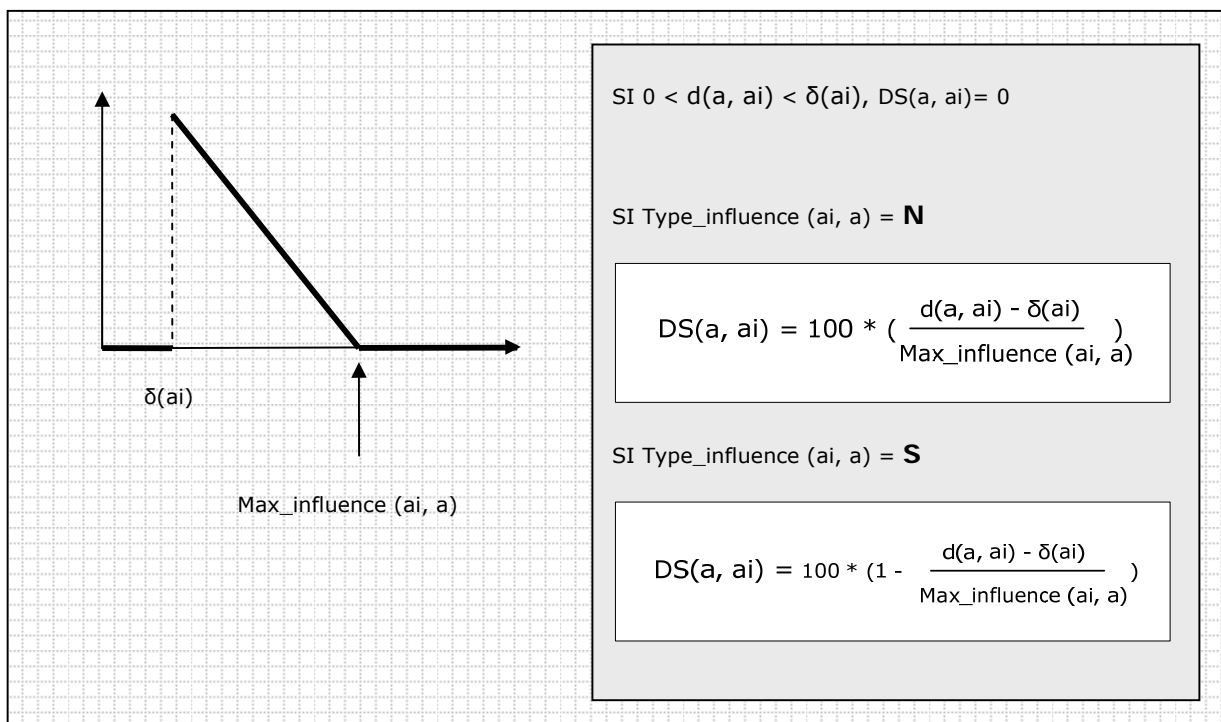


Figure 35 : Calcul du degré de satisfaction d'un agent selon l'influence des programmes voisins

Le degré de satisfaction $DS(a)$ de l'agent a par rapport à toutes les influences fonctionnelles positives et négatives, ainsi que le voisinage est :

$$DS(a) = \frac{\sum_{ai : 1...nai} DS(a, ai) * Coef_influence(a, ai)}{\sum_{ai : 1...nai} Coef_influence(a, ai)}$$

L'exemple de la figure ci-dessous illustre le principe de calcul du degré de satisfaction d'un bâtiment a par rapport à un service ai . Dans ce cas, le degré de satisfaction $DS(a, ai)$ est calculé comme suit : $100 * (1 - (1500-12) / 2000)$. Soit **25.6 %**.

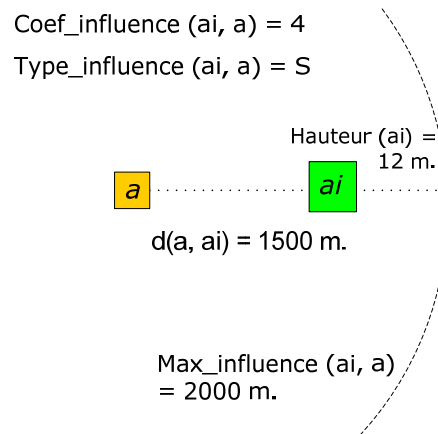


Figure 36 : Illustration du principe de calcul de degré de satisfaction selon l'influence fonctionnelle

Pour le moment, les critères de satisfaction introduits dans le calcul du degré de satisfaction des cellules, puis des bâtiments sont l'influence fonctionnelle et le voisinage.

Pour chaque objet à créer de fonction donnée f , et pour chaque fonction fi influençant cette fonction donnée, le moteur recherche le plus proche objet de fonction fi . Le principe de calcul développé en section 5.3.3 est appliqué selon 2 formules pour les objets d'influence positive ou négative.

Le degré de satisfaction global est ainsi calculé en faisant la somme de ces degrés d'influence, moyennant les coefficients d'influence.

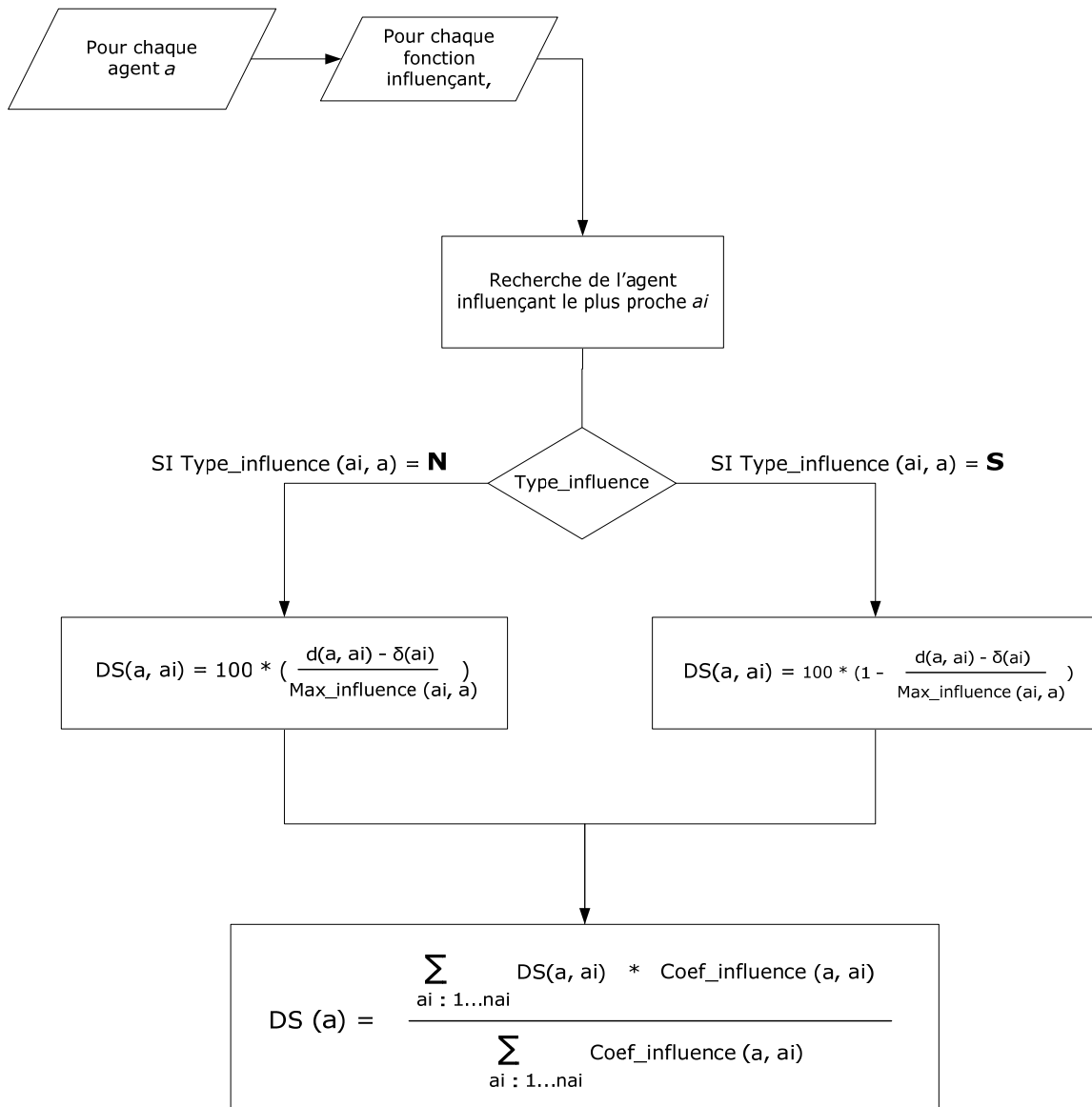


Figure 37 : Méthode de calcul du degré de satisfaction des agents selon l'influence fonctionnelle

Suite à la première modélisation de cette loi (voir rapport 2006), nous avons affiné la modélisation de l'influence fonctionnelle pour le calcul du degré de satisfaction. Nous distinguons maintenant les types de services :

- Dans le cas de la satisfaction de voisinage, nous considérerons, non pas le voisin le plus proche de même fonction, mais tous les voisins présents dans le *buffer* de proximité.
- Dans le cas de fonctions attractives (telles que les écoles pour les logements, ou les entrées sorties d'autoroutes pour les commerces par exemple), un seul objet (i.e. le plus proche) est pris en compte dans le calcul.
- A l'inverse dans le cas des fonctions répulsives (les usines pour les villas par exemple), nous considérons tous les objets de fonction influençant dans un buffer de voisinage (de rayon *max_influence*) et redéfinissons ainsi spécifiquement le calcul en prenant la moyenne des distances.

Ainsi le calcul du degré de satisfaction d'un agent selon l'influence fonctionnelle de ses programmes voisins devient :

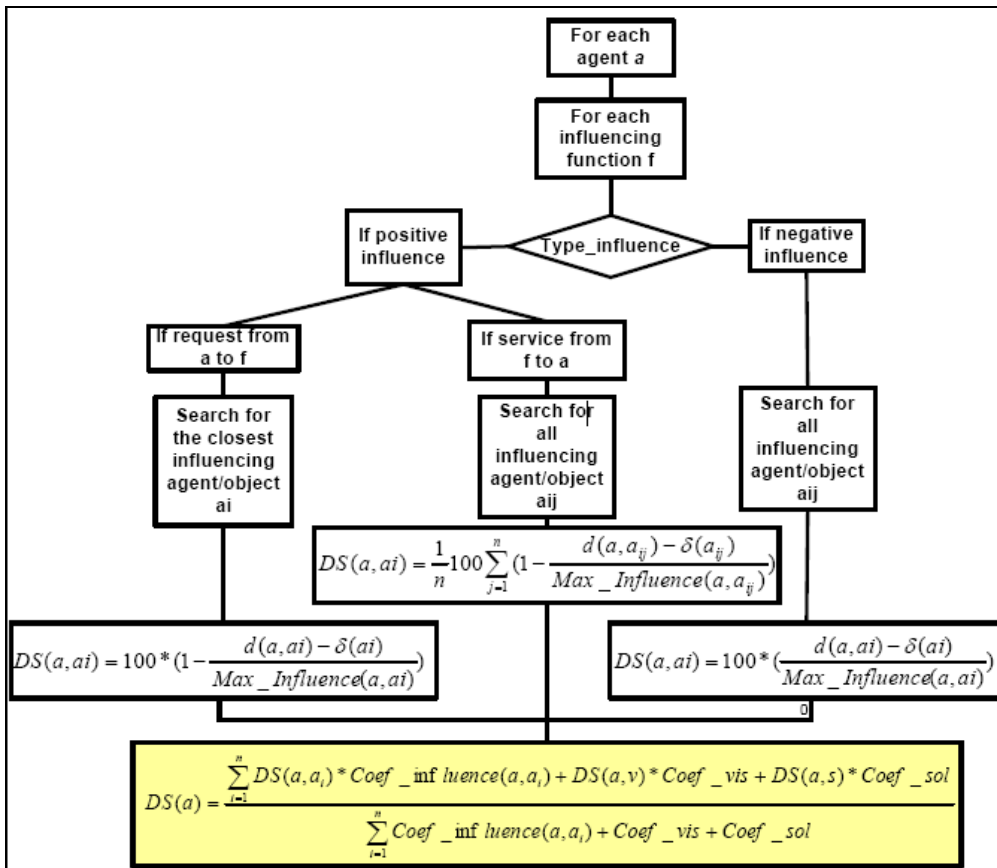


Figure 38 : Calcul du degré de satisfaction selon l'influence fonctionnelle, avec distinction entre logements et services

VISIBILITE

En incluant le facteur de visibilité, le calcul du degré de satisfaction tel que présenté figure 38 est affiné comme suit :

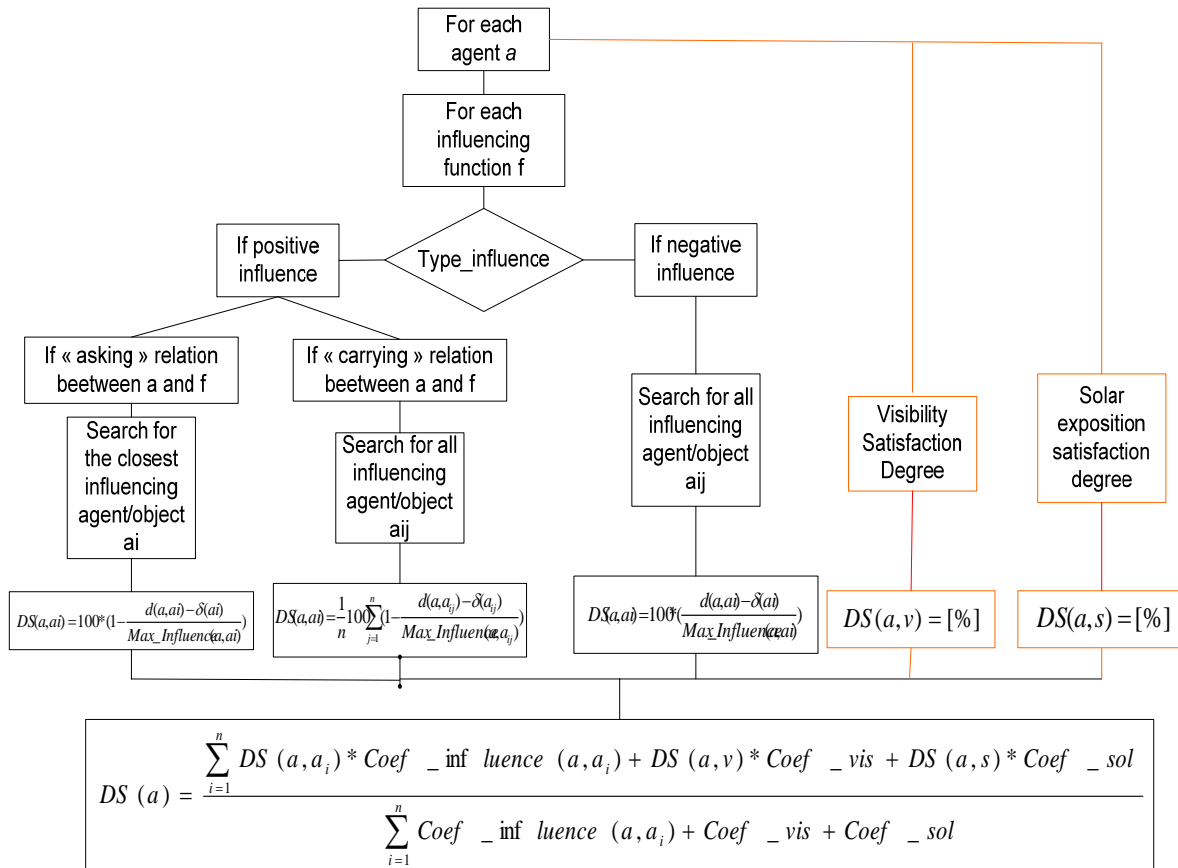


Figure 39 : Calcul du degré de satisfaction incluant la visibilité des bâtiments

Pour calculer la visibilité, nous avons travaillé avec Claudio Carneiro à l'application de données LIDAR 3D sur notre zone d'étude afin de tester le calcul de visibilité au lac depuis chaque agent, et l'impact de sa valeur sur la recherche de meilleure localisation d'agents à naître.

Les données LIDAR¹⁶ s'avèrent particulièrement intéressantes de part leur résolution : environ 6 à 8 points par mètre sur notre zone d'étude, ce qui présente une différence conséquente avec les données terrain de SwissTopo en notre possession (résolution à 25 mètres du MNT25).

MÉTHODOLOGIE DE CALCUL

La méthodologie de calcul de visibilité des bâtiments est exposée brièvement ci-dessous. Pour plus de précisions, il convient de se reporter à la publication à laquelle a donné lieu ce travail : [Silva et al, 2008]. L'approche comprend 3 grandes étapes :

1. Construction du modèle de surface 3D urbain à partir des données LIDAR, telle qu'illustré dans le schéma à la figure ci-après
2. Analyse de la visibilité à partir de chaque bâtiment selon 2 perspectives (cf la figure 41) :
 - a. soit en utilisant directement le modèle de surfaces pour calculer la visibilité depuis la hauteur du toit des bâtiments (à laquelle on ajoute la hauteur moyenne d'une personne : 1,75 mètres) et depuis le sol
 - b. soit en descendant le long de la façade des bâtiments, en prenant un point tous les 3 mètres depuis le haut pour en évaluer la visibilité
3. Mise à jour de l'attribut visibilité dans la table des bâtiments : 0 pour invisible, 1 pour visible. Nous simplifions ici à la visibilité au lac. Cependant le schéma conceptuel des données devrait en réalité porter un lien de la table des bâtiments vers chacun des objets qui pourraient présenter un intérêt potentiel par rapport à la vue (vue sur la cathédrale, vue sur le Jura, etc.)

¹⁶ **LIDAR** est l'acronyme de l'expression anglo-saxonne « *Light Detection and Ranging* » qui désigne une technologie de télédétection ou de mesure optique basée sur l'analyse des propriétés d'une lumière laser renvoyée vers son émetteur. On parle aussi de **laser altimétrique**. La méthode la plus répandue pour déterminer la distance à un objet est basée sur le laser à impulsions. A la différence du radar basé sur un principe similaire, le lidar utilise de la *lumière* au lieu d'ondes radio. La distance à un objet ou à une surface est donnée par la mesure du délai entre l'impulsion et la détection du signal réfléchi. Les données LIDAR ont des applications en archéologie, en géographie, en géologie ou encore en physique de l'atmosphère pour étudier la pollution de l'air par exemple.

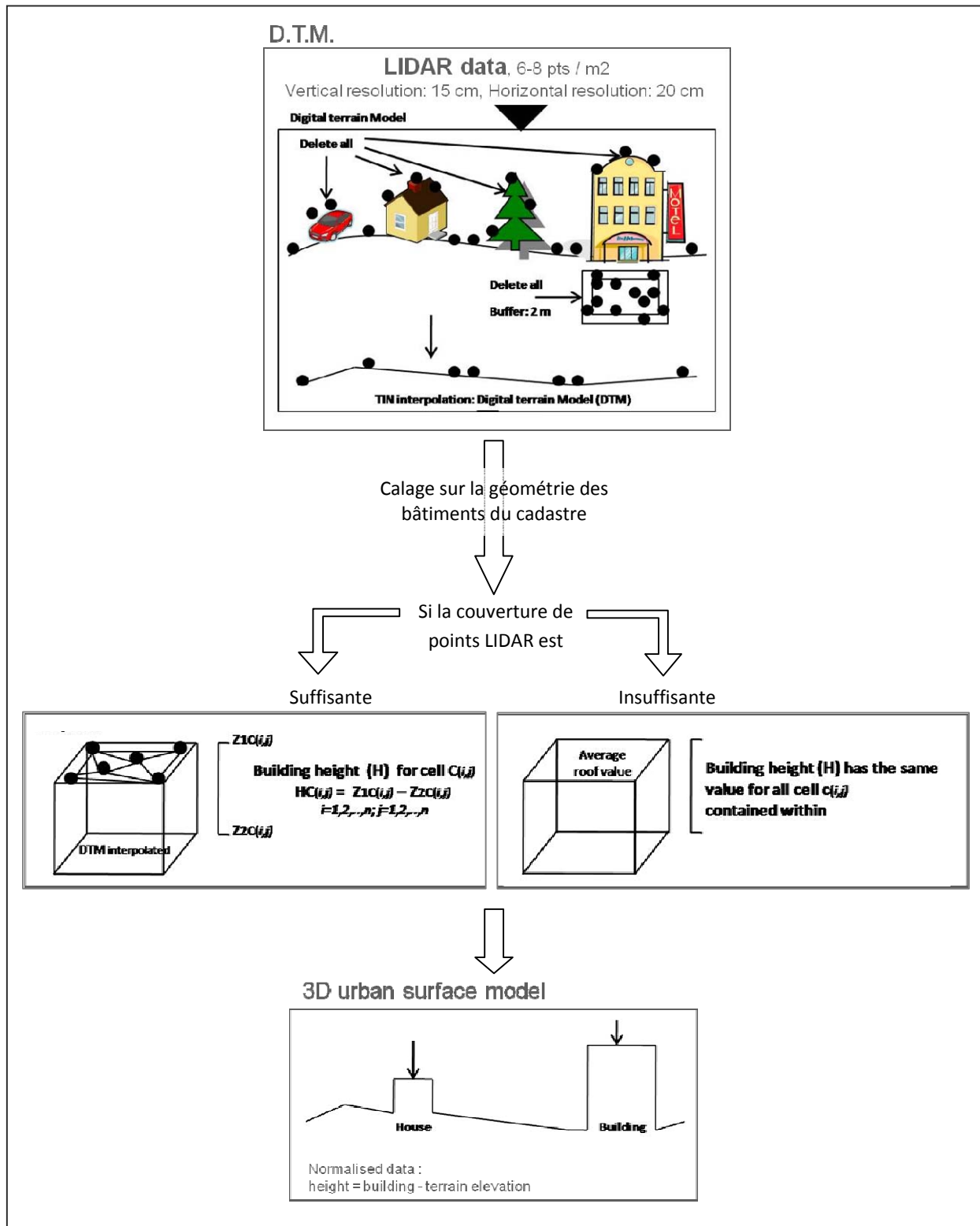
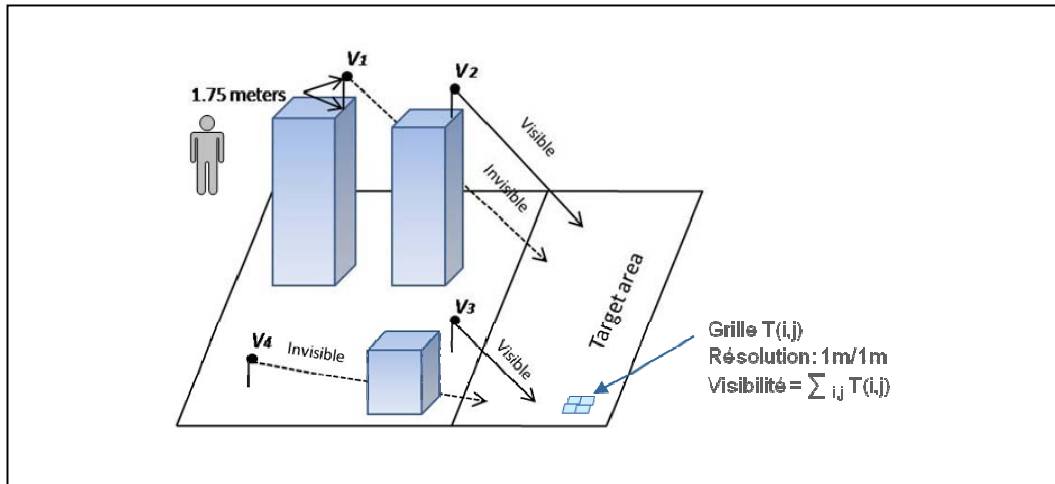


Figure 40 : Construction du modèle de surface 3D urbain à partir des données LIDAR

a : Calcul de visibilité depuis la hauteur du toit des bâtiments (à laquelle on ajoute la hauteur moyenne d'une personne : 1,75 mètres) et depuis le sol :



b : Calcul de visibilité en descendant le long de la façade des bâtiments, en prenant un point tous les 3 mètres depuis le haut :

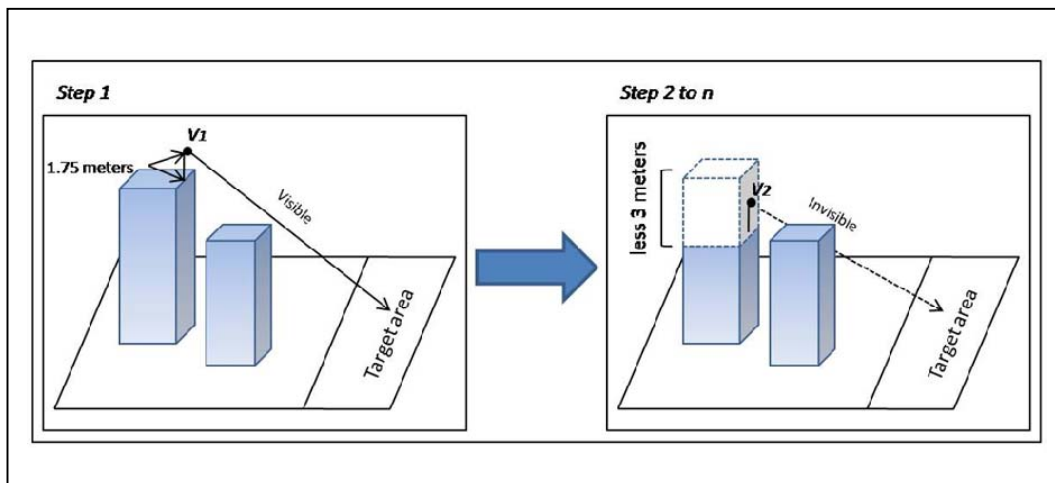


Figure 41 : Méthodes d'analyse de la visibilité depuis les bâtiments

RESULTATS ET PERSPECTIVES

Nous avons mené une première expérience sur notre zone de test. L'analyse de visibilité a été réalisée à partir du TerraSan pour le traitement des données LIDAR, MATLAB pour la programmation et enfin à partir du SIG Manifold pour l'analyse spatiale des données, que l'on peut ainsi intégrer au format shape dans la base de données PostGIS du système par mapping.

Il s'agit d'une première approche qui nous a permis d'évaluer la faisabilité et l'intérêt d'appliquer les données LIDAR dans notre système de simulation.

Les résultats s'avèrent prometteurs tel que le montre la figure ci-dessous. Ce travail applicatif conjoint avec le laboratoire LaSIG ouvre des perspectives intéressantes, non seulement pour le calcul de la visibilité depuis les bâtiments, mais également le calcul de l'exposition solaire des bâtiments, ainsi que le calcul d'indicateurs morphologiques 3D tels qu'évoqués précédemment ou encore la visualisation dynamique 3D, qui sera évoquée au chapitre suivant.

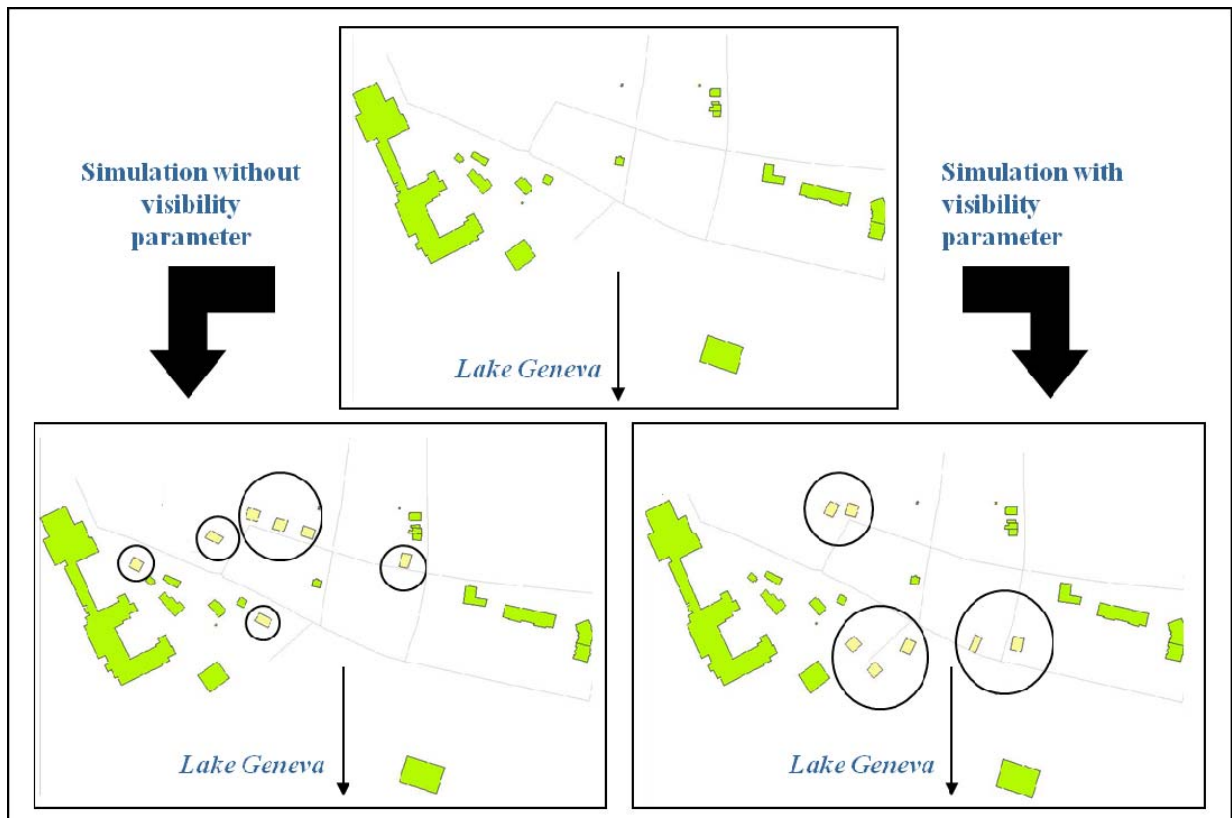


Figure 42 : Comparaison des résultats de simulation sur la zone de test sans (à gauche) / avec (à droite) prise en compte de l'indicateur de visibilité des bâtiments

Nous avons ainsi pu vérifier l'importance de l'indicateur de visibilité sur les résultats de localisation des bâtiments, d'où l'importance d'utiliser des données 3D de grande résolution. L'amélioration de la méthodologie mise en place pour cette première approche nous permettra certainement une meilleure interprétation de leur importance.

La figure ci-dessous montre le résultat de l'analyse de visibilité au lac depuis le toit d'un bâtiment de notre zone de test (en jaune en haut de l'image). La surface en jaune correspond à la partie du lac visible depuis ce point.

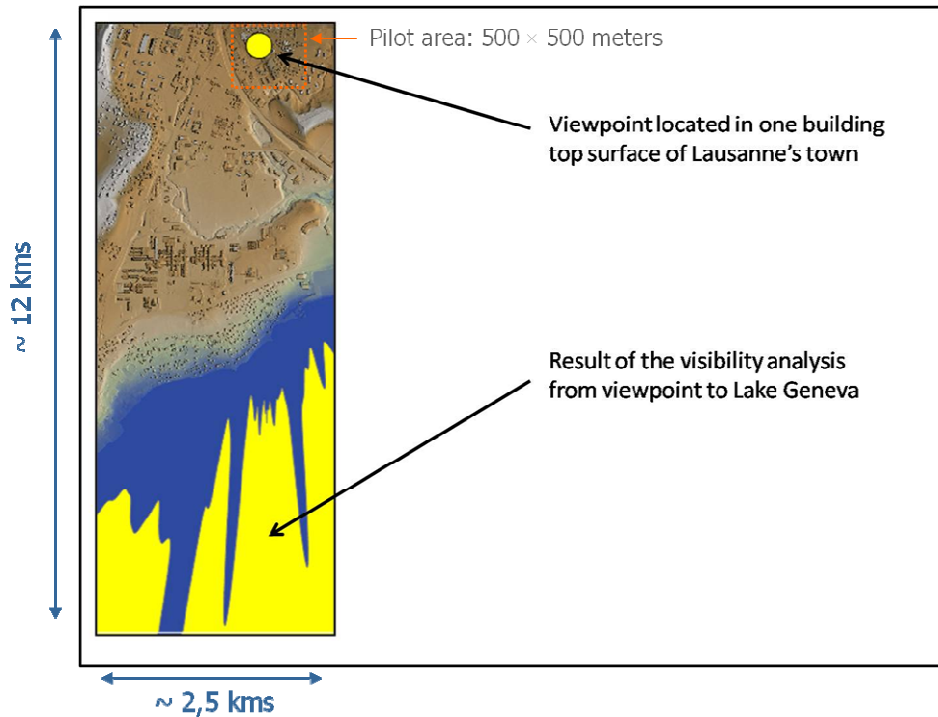


Figure 43 : Résultat d'analyse de visibilité au lac depuis le toit d'un bâtiment de notre zone de test

Cette figure montre que nous avons dû nous contraindre à un angle de visibilité étroit, du fait des temps de calculs particulièrement gourmands : en effet chaque point demande 2 à 5 minutes de calcul pour une grille de 3'000'000 pixels. Ce point devra donc être amélioré.

De plus, nous avons vu que l'implémentation se fait en dehors du système. Pour pouvoir intégrer le calcul à chaque transition de la simulation, il nous faudra développer une librairie Java qui puisse être intégrée directement au moteur. Ceci permettra de calculer la visibilité potentielle depuis de nouveaux bâtiments à construire, et nous permettra également d'envisager la visualisation dynamique 3D.

LA RECHERCHE DE LOCALISATION

RECHERCHE DES POINTS DE LOCALISATION POTENTIELLE DE MEILLEURE SATISFACTION

Dans le premier prototype, rappelons que la meilleure localisation (i.e. celle de plus haut degré de satisfaction par rapport à la fonction) lors de la création d'un bâtiment était calculée sur la base d'une grille afin de discrétiser l'espace. La méthode est détaillée dans le rapport 2006.

Dans le prototype développé sur la plateforme GeOxygene, les points sur lesquels nous testons le degré de satisfaction ne sont plus positionnés sur une grille, mais sont en priorité le long des routes selon un pas, et sur les zones d'affectation adéquates pour la fonction donnée.

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 :

- 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 (*figure ci-dessous*). On échantillonne les « clones » pour obtenir des points espacés de 5 mètres.

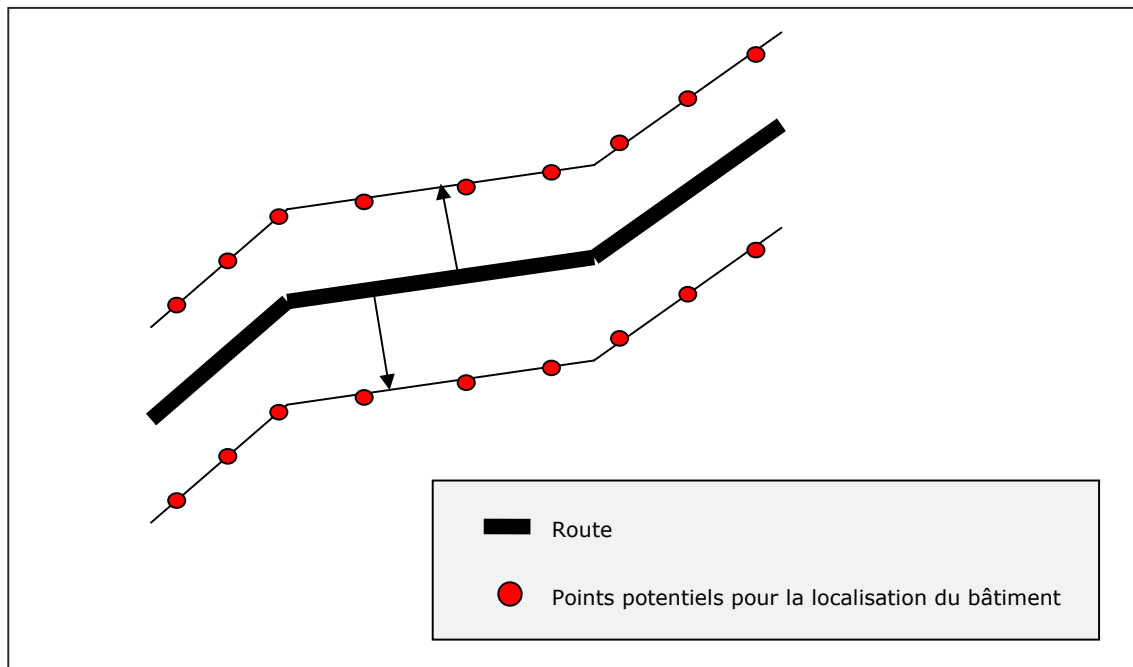


Figure 44 : Points potentiels pour la localisation du bâtiment

- 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 *figure ci-dessous* 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.

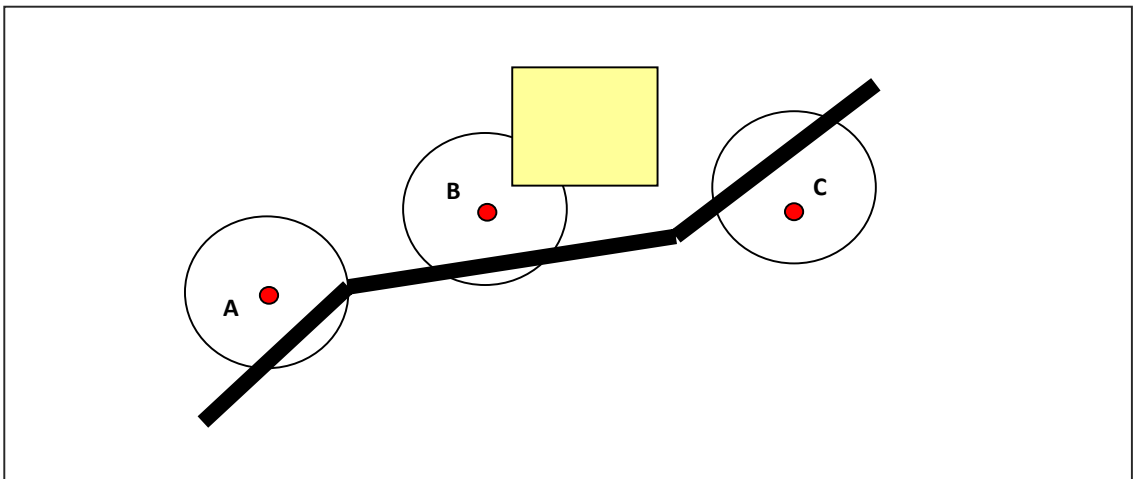


Figure 45 : Intersection des buffers avec les surfaces existantes

- 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 degré de satisfaction 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 (*figure ci-après*).

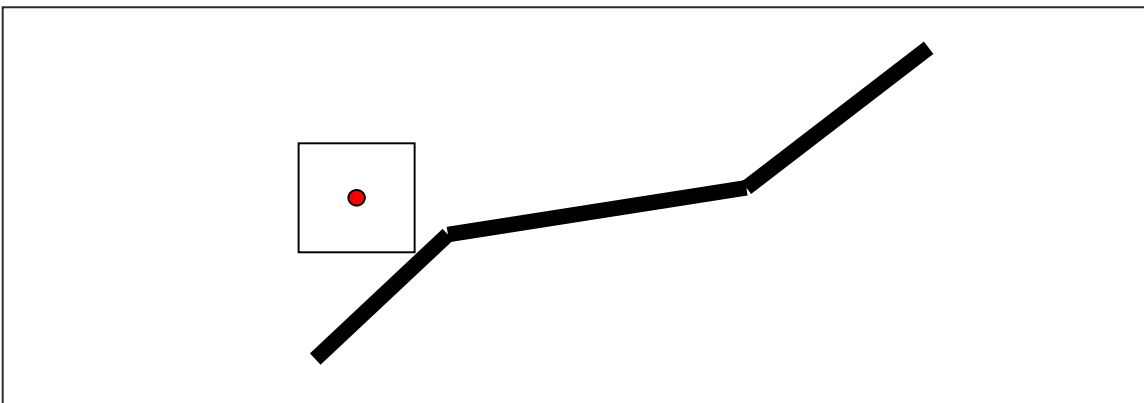


Figure 46 : Localisation du polygone représentant le bâtiment sur le point retenu

PROGRAMMATION ET ORIENTATION DES BATIMENTS A CREER

Dans un premier temps, les bâtiments étaient placés systématiquement selon une orientation nord-sud, et programmés sur la base d'une géométrie standard pour chaque fonction.

Nous avons amélioré l'opération en générant aléatoirement des formes rectangulaires à partir d'une surface type pour chaque fonction, et en orientant les formes générées de façon à ce qu'elles soient parallèles à la route la plus proche (par rapport à l'angle de la droite des moindres carrés formée par le segment de route le plus proche du centroïde du bâtiment).

L'algorithme que nous avons mis en œuvre s'articule comme suit :

1. Tirage aléatoire de la longueur des côtés du rectangle à générer :

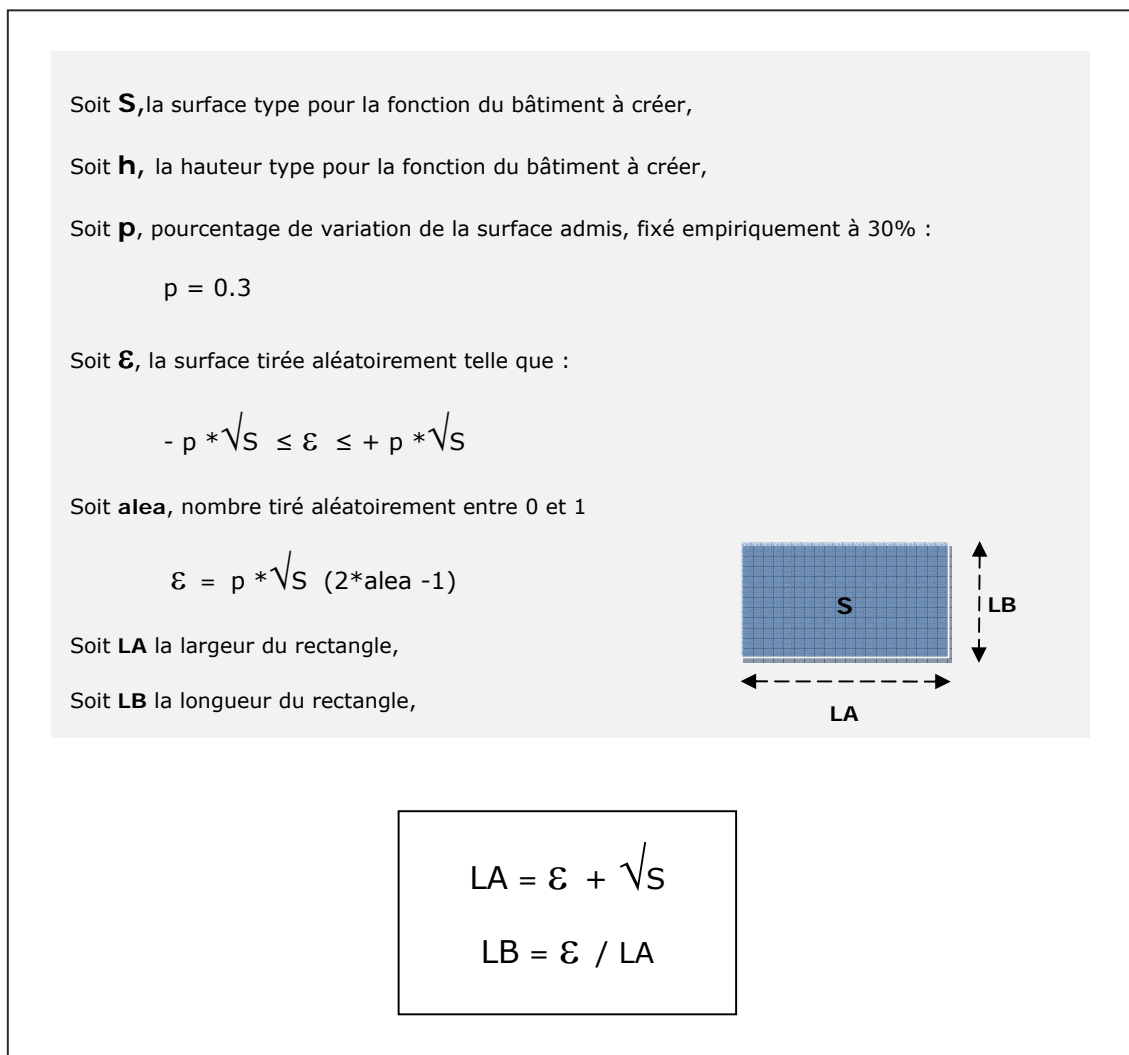


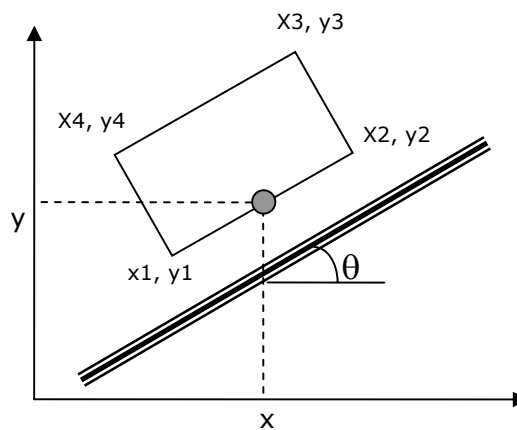
Figure 47 : Algorithme de tirage aléatoire de la longueur des côtés du rectangle à générer

2. Calcul des coordonnées du bâtiment et rotation pour alignement à la route la plus proche :

Soit θ , l'angle que fait la route avec l'horizontal

Soit (x, y) , les coordonnées du point correspondant au milieu du côté adjacent à la route

Soit $(x_1, y_1), (x_2, y_2), (x_3, y_3), (x_4, y_4)$ les coordonnées du bâtiment



$$x_1 = x - (\cos(\theta) * LA/2)$$

$$y_1 = y - (\sin(\theta) * LA/2)$$

$$x_2 = x + (\cos(\theta) * LA/2)$$

$$y_2 = y + (\sin(\theta) * LA/2)$$

$$x_3 = x_2 + (\cos(\theta + (\pi/2)) * S / LA)$$

$$y_3 = y_2 + (\sin(\theta + (\pi/2)) * S / LA)$$

$$x_4 = x_1 + (\cos(\theta + (\pi/2)) * S / LA)$$

$$y_4 = y_1 + (\sin(\theta + (\pi/2)) * S / LA)$$

Figure 48 : Calcul des coordonnées du bâtiment à générer

Ceci est une première ébauche pour la programmation des bâtiments. Il conviendra notamment d'étendre le calcul à des formes complexes, ainsi que la programmation de groupes de bâtiments (travail à mener conjointement au doctorat de Jong-Jin Park sur l'optimisation).

De plus, il conviendra de calculer l'orientation des bâtiments en fonction d'autres contextes telles que la pente du terrain, la vue sur le lac, etc.

CALIBRATION ET VALIDATION DU MODELE

Une dernière phase d'expérimentations et d'analyse critique des résultats de simulations est indispensable pour calibrer et de valider le modèle. Là encore, il conviendra d'acquérir les données terrain nécessaires, et les ressources pour un travail de doctorat.

8 Visualisation

VISUALISATION EN 2D

Les résultats sont une série d'images JPEG capturées dans le script SIG lors de chaque étape du processus de simulation : création ou disparition de bâtiment.

La série d'images est alors extraite du SIG et exploitée sous le logiciel Macromedia Flash afin de créer une animation au format standard ShockWave, qui permet ainsi de visualiser les transformations en continu indépendamment de tout logiciel.

Nous obtenons donc à travers ce type d'animation, une visualisation dynamique en 2D.

RENDU DYNAMIQUE 3D

Les résultats sont une série d'images JPEG capturées lors de chaque étape du processus de simulation. La série d'images permet de créer une animation ShockWave ou AVI, qui permet de visualiser les transformations en continu indépendamment de tout logiciel.

Les résultats sont actuellement visualisables en 2D. Nous prévoyons une extension 3D par export des données au format KML de Google Earth.

Une autre réflexion pourrait concerner les possibilités de représentations multi-échelle (autre sujet de doctorat). Changer à tout moment de point de vue et d'échelle d'affichage implique la possibilité d'avoir différents niveaux de représentation de la métropole : du bâtiment aux surfaces représentant l'agrégation de bâtiments ou de quartiers, voire à l'échelle de l'arc lémanique afin de visualiser l'entier de la métropole. A l'échelle globale, pour offrir une vue lisible, il serait intéressant de ne montrer par exemple que les points correspondants aux centres urbains, les grands programmes architecturaux et les surfaces correspondants aux micro systèmes avec des classifications thématiques, afin de donner à voir l'influence des grands programmes sur les quartiers.

Le rendu visuel que nous offrons à partir du premier prototype consiste en une animation flash réalisée à partir des images *Jpeg* des étapes de la simulation. Cette première approche n'est pas satisfaisante, car elle est en 2D et ne permet pas d'afficher séparément les couches d'objets.

Nous avons réalisé différents tests :

- Une solution consiste à créer une animation à partir d'objets au format vecteur standard DXF. Cela nécessite d'écrire un script *Manifold* pour exporter les objets couche par couche en DXF à chaque étape, puis un script *ActionScript* pour la programmation en Flash pour importer les DXF dans les *layers*.
- Une autre solution envisagée est l'export des coordonnées 3D des bâtiments au format KML (*Keyhole Markup Language*), langage XML pour l'affichage des données 3D sur la plateforme

Google Earth. La figure ci-dessous montre un exemple de visualisation des bâtiments sur Google Earth.



Figure 49 : Bâtiments extrudés sur Google Earth au format KML

Les solutions évoquées ne nous ont pas parues satisfaisantes. Nous envisageons l'application des données LIDAR pour un rendu 3D plus réaliste, analogue à la capture d'écran de la figure ci-dessous.



Figure 50 : Rendu 3D réaliste

9 Architecture du système

Un prototype avait été développé, durant la première année de projet, en Visual Basic Script sur le SIG Manifold 7.0. Les développements ont été migrés dès la deuxième année sur une plateforme *opensource*.

GeOxygene (<http://oxygene-project.sourceforge.net/>) est une plateforme de développement SIG *Open Source* basée sur les caractéristiques d'OGC/ISO, développée par le laboratoire COGIT de l'IGN-France (Institut Géographique National), selon les termes de licences LGPL (GNU Lesser General Public License).

Nous en avons fait l'objet d'une évaluation détaillée durant les mois de décembre 2006 et janvier 2007. Le choix a été arrêté en février 2007 suite à une première visite à l'IGN qui a abouti à la conclusion d'un partenariat de recherche et développement.

Cette solution logiciel présente les avantages d'être *open source*, ce qui nous permet aisément d'intégrer nos propres modules, d'être développée en Java ce qui permet portabilité et interopérabilité, d'avoir une librairie très riche de fonctions SIG telles que par exemple le calcul de distance à travers un réseau (une des critiques en 6.3.3 citées dans le rapport 2006), et enfin de nous offrir le support compétent et disponible des chercheurs du laboratoire de l'IGN-France.

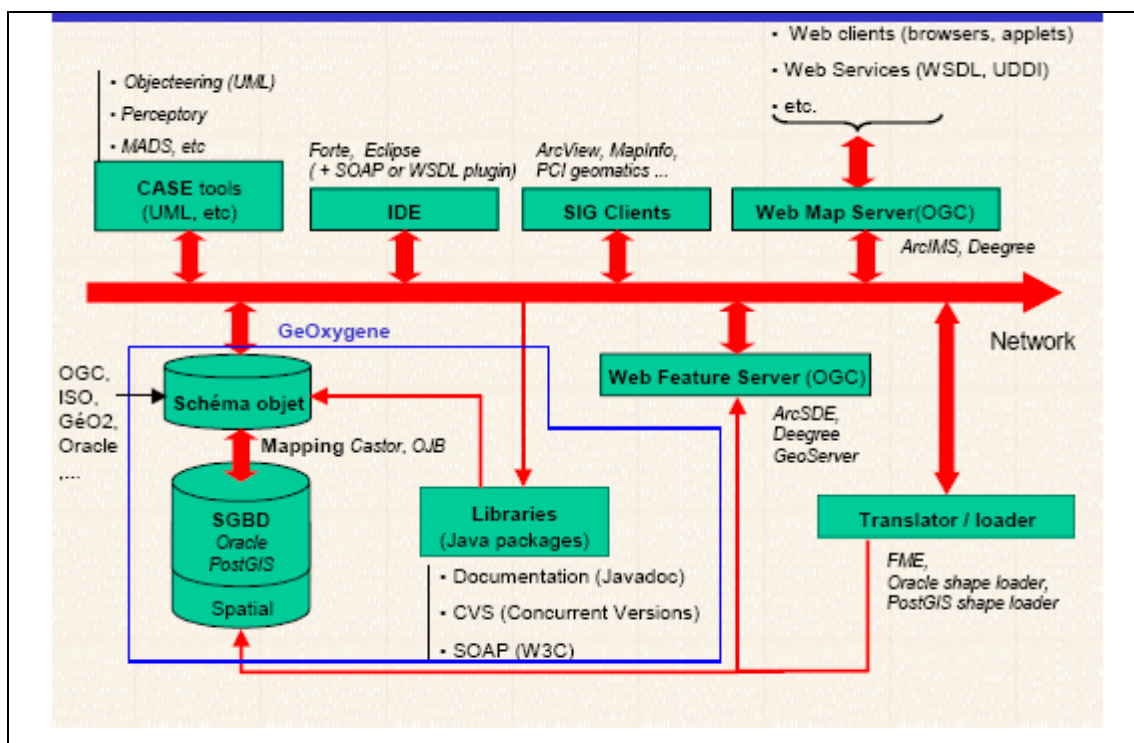


Figure 51 : Architecture de la plateforme GeOxygene, principaux composants

GeOxygene fournit aux utilisateurs un modèle de données Objet extensible (objets géographiques, géométrie, topologie et métadonnées) qui met en application les spécifications OGC (Open GIS Consortium) et les standards ISO dans le domaine de l'information géographique.

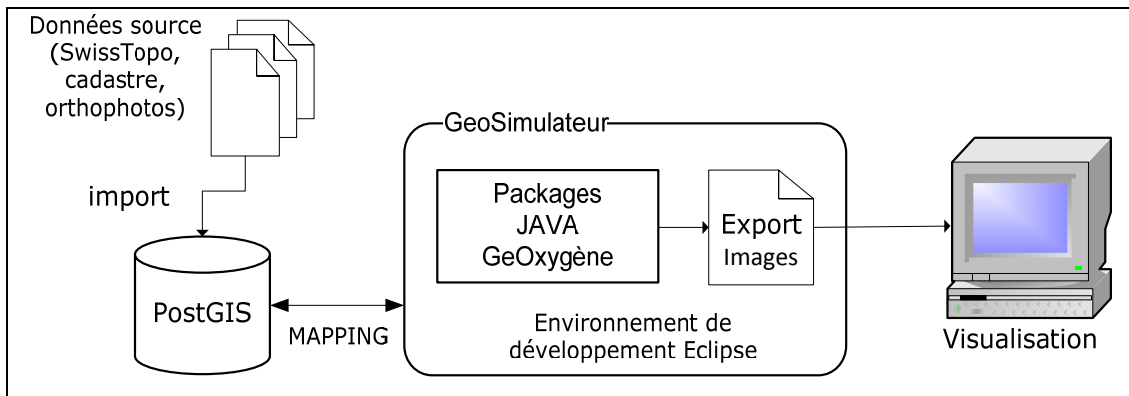


Figure 52 : Architecture informatique du géosimulateur

La persistance des données est assurée par le système de gestion de bases de données relationnel PostGIS (SGBDR opensource à extension spatiale) afin d'assurer un accès rapide et fiable au système.

L'application adresse les objets Java sans passer par des requêtes *SQL*, le *mapping* entre les classe Java et les tables relationnelles étant assuré par une interface spécifiquement développée à partir de la passerelle *OJB* (*Object RelationalBridge*).

10 Résultats

SCENARIOS POUR LA PREDICTION

Nous présentons ci-dessous des captures d'écran illustrant chaque étape de 2 scénarios de morphogenèse d'un quartier de Chavannes-près-Renens à partir des bâtiments existants figurés en vert :

- ✓ Le scénario 1, constitué des 8 images en page 9, montre la croissance naturelle de la ville par la création de logements (en jaune clair) à proximité des routes et selon le degré de satisfaction (DS). Les bâtiments choisissent leur emplacement selon la proximité des divers services et maximisent leur DS. C'est le cas par exemple des premières villas qui se placent naturellement près de l'école (grand bâtiment vert à gauche de l'image)
- ✓ Le scénario 2, en page 10, démarre du même état initial que le premier. Ensuite un programme architectural (ensemble de bâtiments de services dans notre cas : restaurant, cinéma, commerces - en rouge) est implanté dans la zone d'étude. Les logements sont encore une fois créés naturellement selon le DS. Cette fois ils choisissent de s'implanter à proximité du nouveau programme. L'impact du programme architectural est donc significatif sur la morphogenèse.

SCÉNARIO 1 : CROISSANCE NATURELLE

La série de captures d'écran ci-dessous à la figure 53 montre la croissance naturelle, sans perturbation, d'une zone de Chavannes.

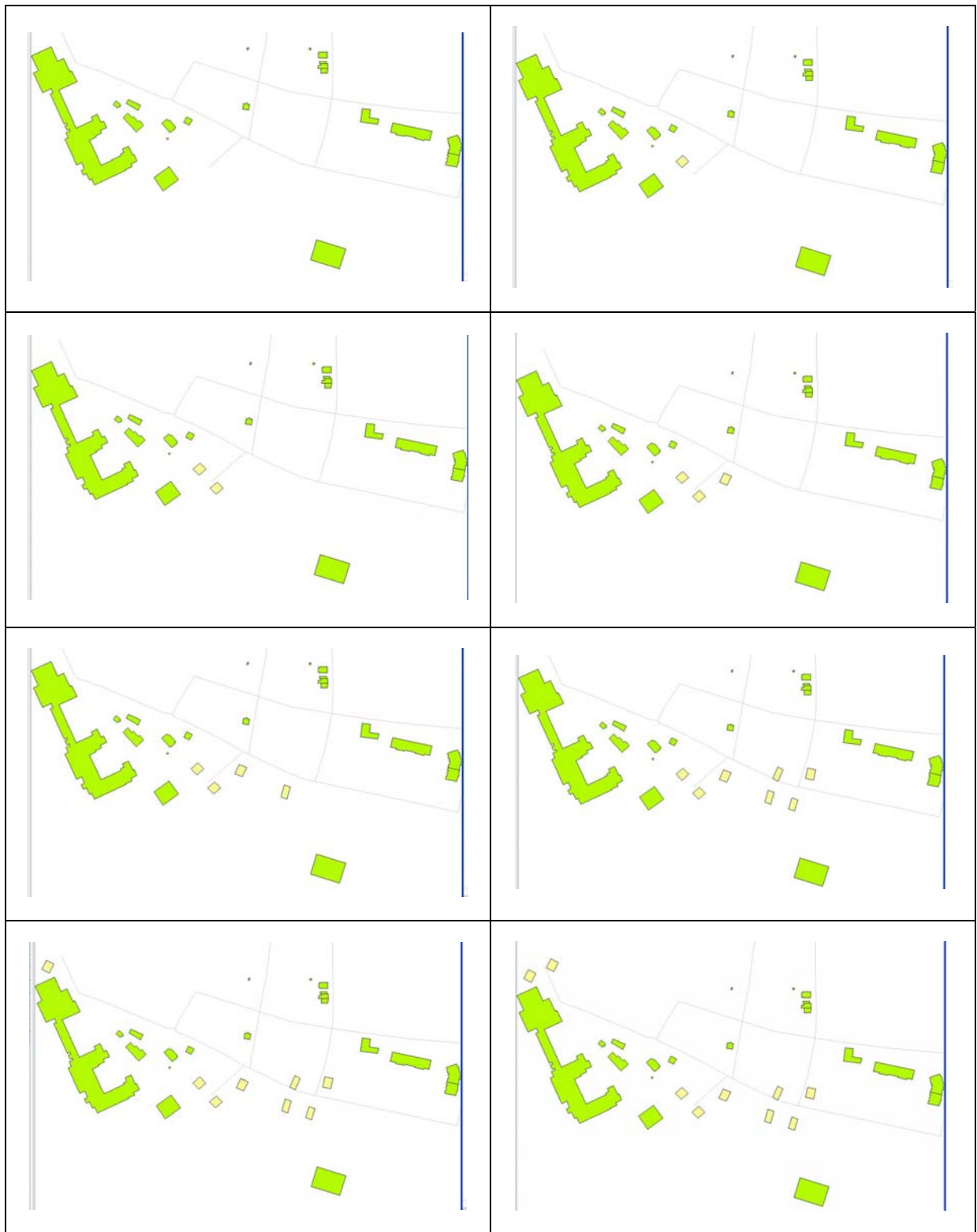


Figure 53 : Croissance naturelle en 8 images

SCÉNARIO 2 : IMPACT DE L'IMPLANTATION D'UN NOUVEAU PROGRAMME

La série de captures d'écran ci-dessous montre l'impact d'un grand programme (un cinéma, des commerces et un restaurant dans l'exemple) sur la dynamique de la zone, en comparaison de la croissance naturelle résultante précédemment.

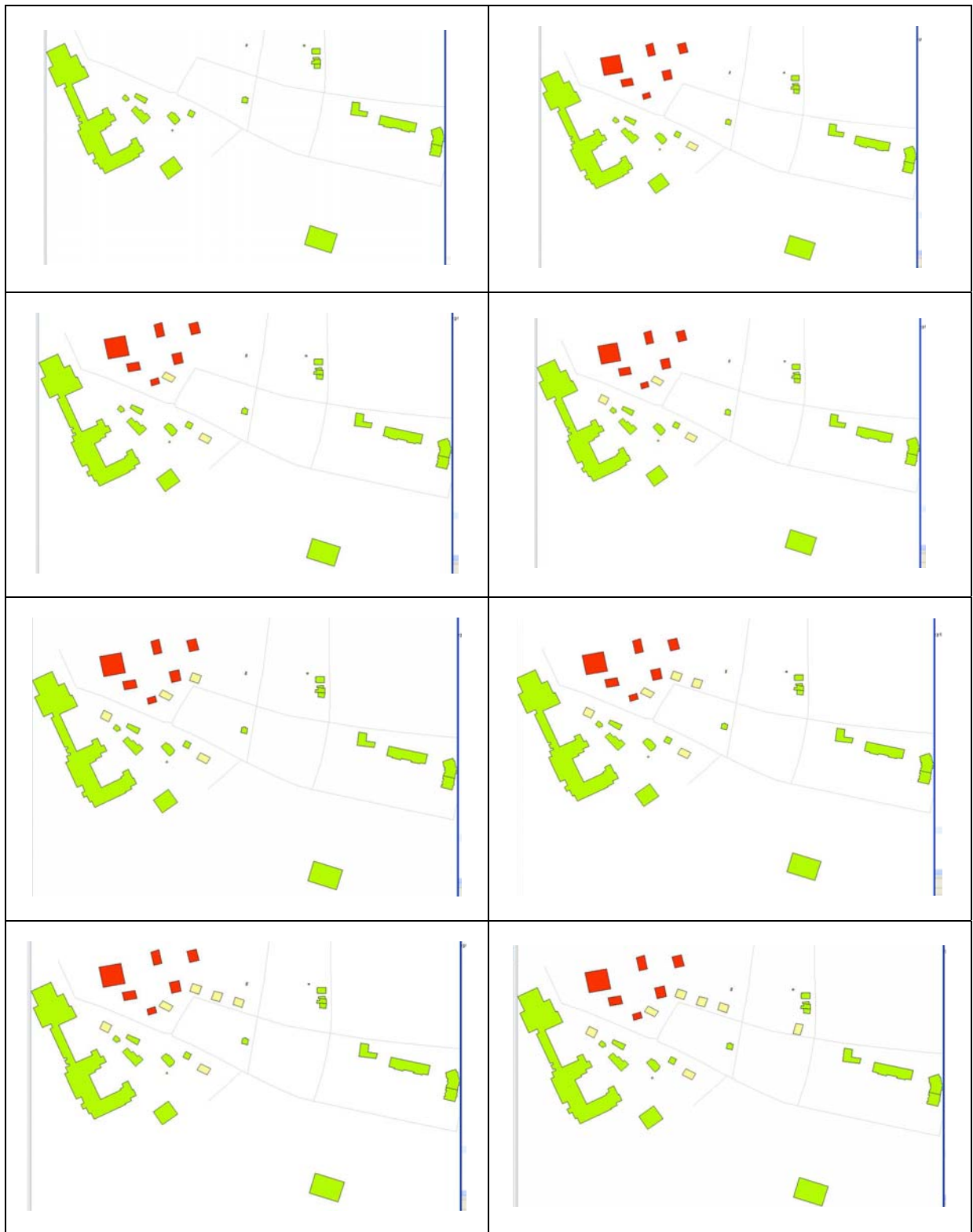


Figure 54 : Impact de l'implantation d'un grand programme sur la dynamique urbaine

SIMULATION DETERMINISTE VS SIMULATION AGENT

Afin de montrer l'apport de la méthodologie Multi-Agent, nous présentons ci-dessous un exemple de création d'une école dans la commune de Chavannes selon deux types simulation : déterministe et par systèmes multi-agents.

CONTEXTE DE LA SIMULATION

Dans la commune de Chavannes-près-Renens on désire créer une nouvelle école secondaire dans les années 1970 pour répondre à la croissance de la population. On va réaliser ici deux types de modélisations différentes (déterministe et multi-agents) et les comparer à la réalité. La situation du point de vue du développement urbain en 1971 est présentée à la figure 55. On peut remarquer que 6 écoles secondaires se trouvent dans la zone d'étude.

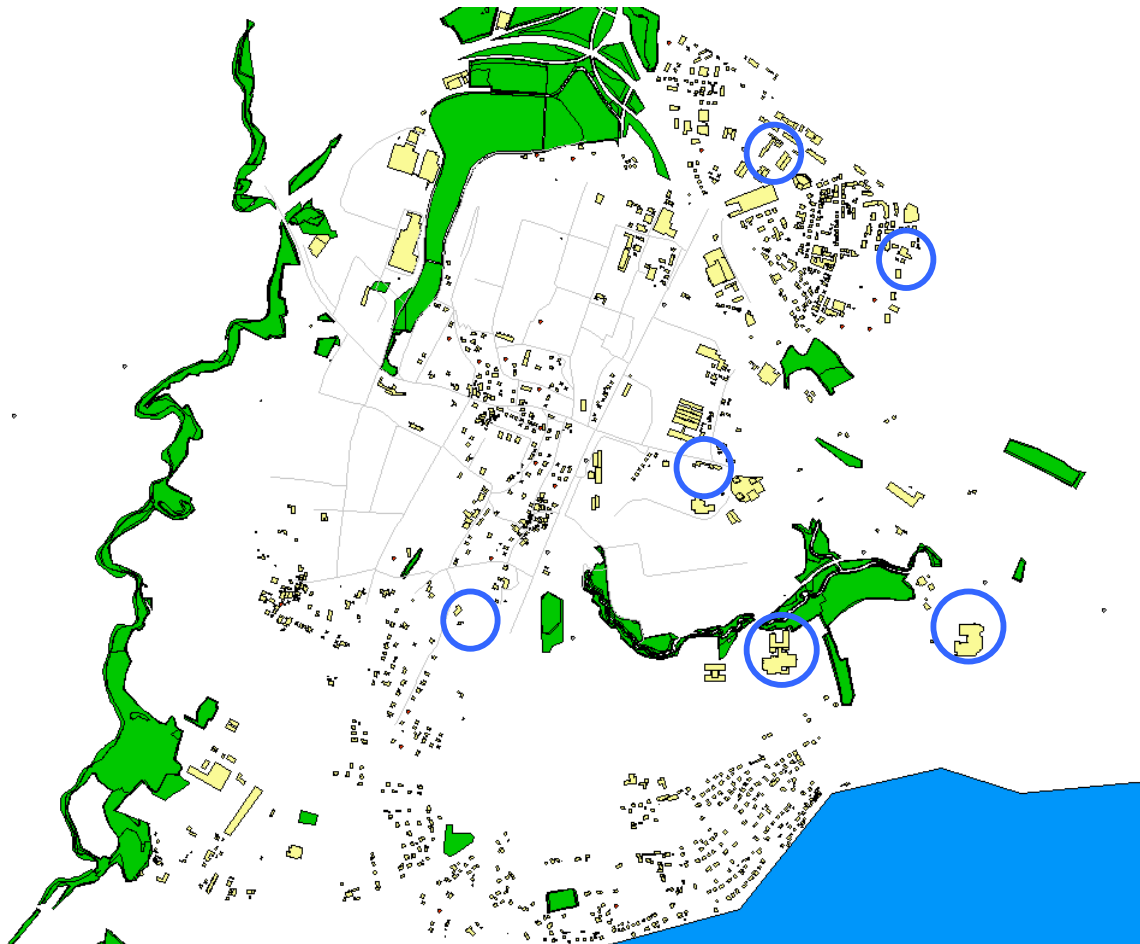


Figure 55 : Développement urbain de la zone de Chavannes-près-Renens en 1971 avec les écoles secondaires existantes (entourées de bleu)

SIMULATION DETERMINISTE

En fonction de l'existant en 1971 on simule la création d'une nouvelle école d'après le calcul du degré de satisfaction (*Degré de Satisfaction*). Ici on va simuler la création d'une école en se basant uniquement sur le *Degré de Satisfaction* sans considérer une interaction entre les agents commune, groupe de logements et école. On lance simplement la création d'une école dans la zone d'étude et cette dernière se placera au mieux dans territoire du point de vue de son DS (*Degré de satisfaction*). Il n'y donc pas de notion de communication entre les agents ni de négociation et donc pas d'intelligence artificielle distribuée. Les résultats de la simulation déterministe sont donnés à la figure 56 ci-dessous.

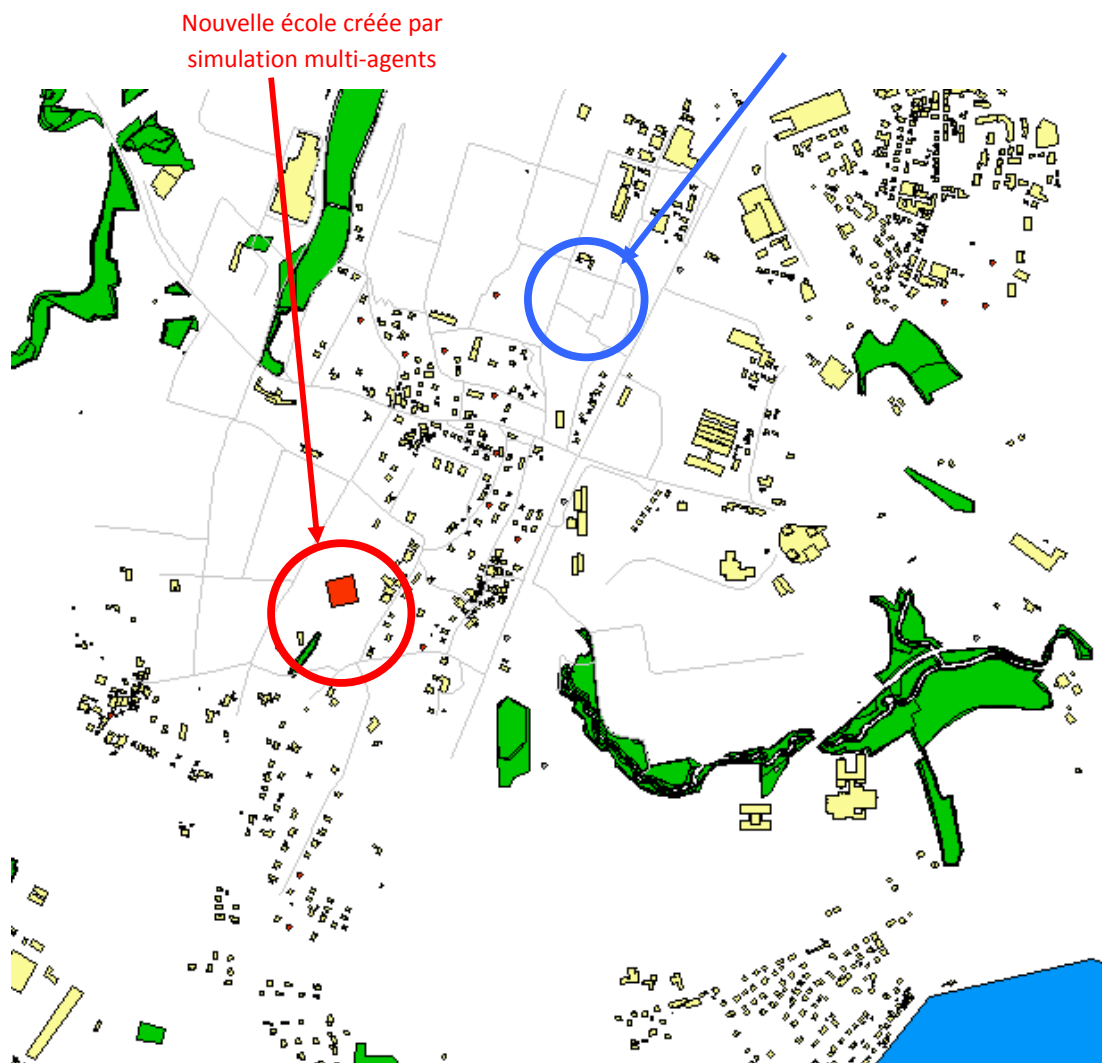


Figure 56 : Résultat de la simulation déterministe

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

SIMULATION SELON UNE APPROCHE MULTI-AGENTS

On va maintenant utiliser une approche multi-agents en faisant intervenir des agents communiquant entre eux. Dans le même contexte que précédemment, on considère les bâtiments de logements voulant se créer dans la commune comme des groupes de logements. Ces groupes de logements sont des agents et donc dotés de capacités cognitives. Un groupe de logements se compose en principe de 300 habitants dont une partie est composée d'enfants d'âge scolaire (des collégiens dans le cas considéré ici). Ces écoliers ont donc besoin d'une école à proximité qui puisse les accueillir. La commune dispose de plusieurs écoles (cf figure 55). Le groupe d'habitants 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 bâtiments et ensuite vérifier s'il y reste de la place. Si tel n'est pas le cas alors elle demande à l'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 1970 (cf figure 57). Ces groupes ne représentent pas 300 habitants comme dit ci-dessus, mais on n'a pas trouvé de groupe de 300 habitants voulant se créer dans cette période-là, on a donc préféré faire plusieurs fois la simulation avec des petits groupes et aboutir à un emplacement moyen.

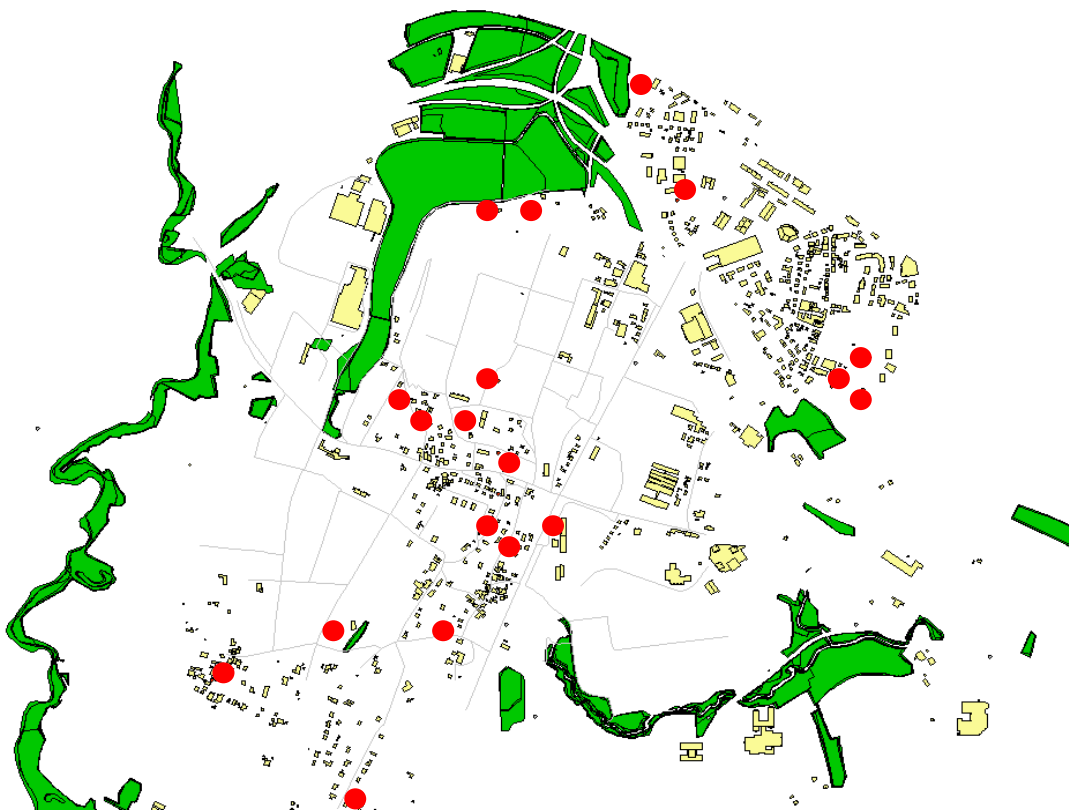


Figure 57 : Groupes de bâtiments de type logement à créer dans les années 1970 dans la zone de Chavannes-près-Renens

Brièvement on peut résumer la modélisation de l'interaction (communication entre les agents) par le schéma UML présenté à la figure précédente.

Du point de vue de la communication entre les agents et de l'échange de messages, le cheminement est le suivant :

- Envoi d'un *Message Action* du groupe à la commune : le nouveau groupe composé de a besoin d'une école et fait une demande à la commune. La commune possède plusieurs écoles secondaires et chaque école dessert en principe environ 2500 habitants (ce qui représente, comme vu ci-dessus, 425 collégiens potentiels).
- 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 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'école de vérifier s'il lui reste de la place pour accueillir de nouveaux élèves.
- Lecture du *Message Valeur* par l'école et envoi d'un *Message Valeur* : l'école calcule le nombre d'habitants dans un rayon de 2000 mètres ainsi que le nombre d'écoles. De cette façon elle peut avoir une idée du nombre moyen d'habitants desservis par chaque école dans ce buffer. Si le nombre d'habitants desservis par l'école est supérieur à 2200 (= 2500 habitants desservis en moyenne par une école - 300 habitants du groupe) alors la commune devra créer une nouvelle école pour les nouveaux collégiens. L'école 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'école. Suivant la réponse de l'école on a les deux cas suivants :
 1. Si l'école refuse d'accueillir de nouveaux élèves (cas considéré ici):
 - La commune demande à l'école de s'agrandir.
 - Si l'école refuse de s'agrandir : création d'une nouvelle école à proximité du groupe (cas considéré ici).
 2. Sinon en cas d'acceptation, l'école peut accueillir les nouveaux élèves.

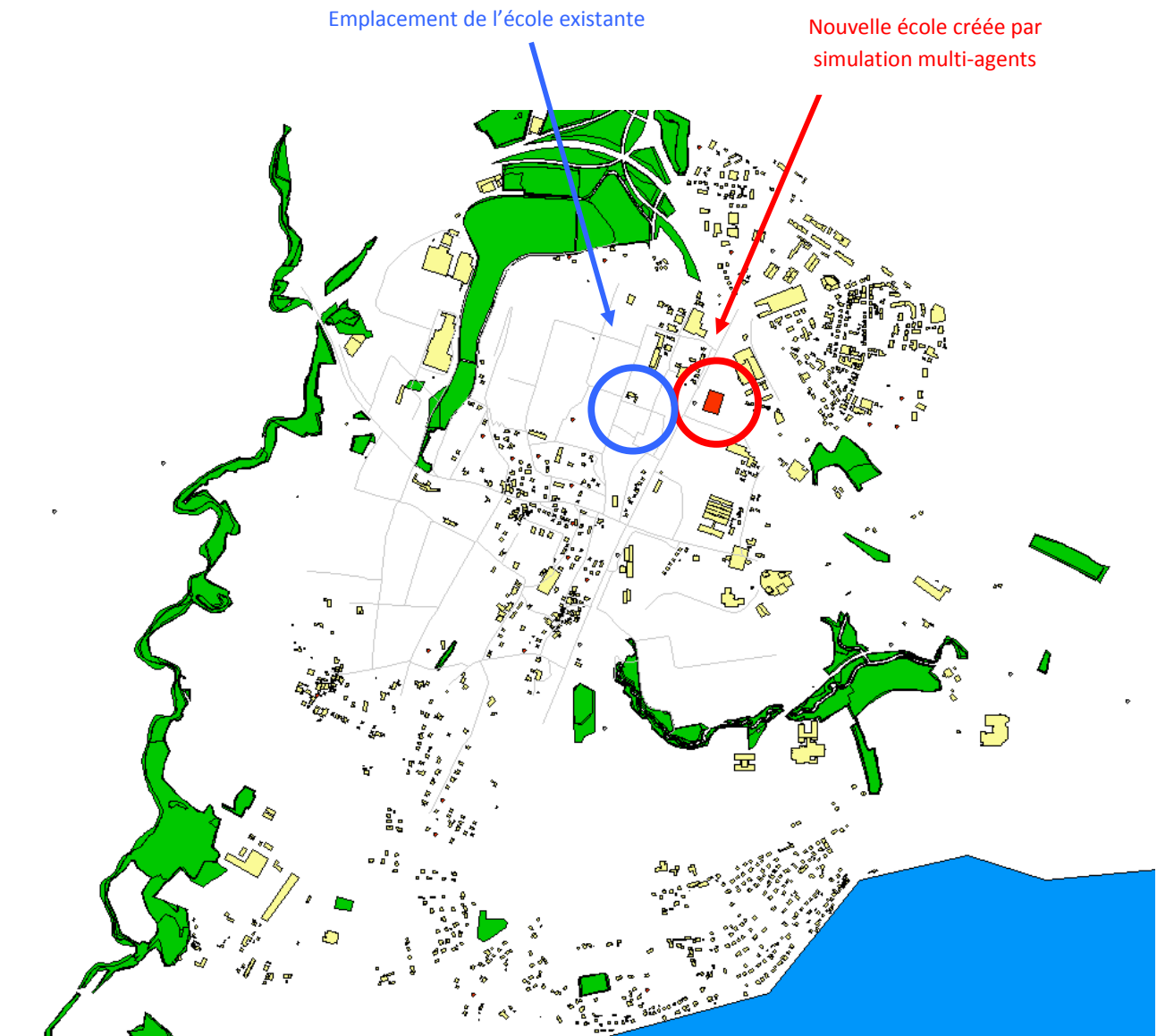


Figure 59 : Nouvelle école créée par simulation multi-agents

La figure ci-dessus montre la création de la nouvelle école. Cette dernière ne s'est pas créée sur l'emplacement réel mais à proximité. Ce résultat est meilleur que celui de la simulation déterministe. La simulation par systèmes multi-agents 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 pour valider ce résultat et faire varier les paramètres de l'interaction entre les agents.

PUBLICATIONS

Les travaux ont donné lieu à 3 publications majeures durant les 3 années de projet :

- ✓ Plazanet, C., Silva, V.: *Vector Approaches to urban morphogenesis modelling*. Poster on 10th GeoComputation Conference, 3rd-5th September, Ireland, 2007

Prix du meilleur poster

- ✓ Silva, V., Plazanet, C., Carneiro, C. Golay, F. *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, 2008

Papier sélectionné pour publication dans le livre :

Geocomputational analysis for urban planning

Séries *Studies in Computational Intelligence*

Publication *Springer-Verlag*

- ✓ Jong-Jin Park, Corinne Plazanet, Vitor Silva, Patrick Berger, *Simulation de la morphogenèse urbaine : Approche multi-agent vecteur multi-échelle*. En cours de finalisation pour soumission à la revue internationale de géomatique

11 Conclusion

L'objectif majeur de ce projet consistait à démontrer l'intérêt et la faisabilité d'une recherche sur la simulation de la morphogenèse des métropoles par une démarche interdisciplinaire. Il s'agissait ainsi d'un premier « défrichage » du domaine de recherche sur la simulation urbaine d'un point de vue de sa matérialité.

L'objectif est atteint, puisque le projet débouche directement sur des applications concrètes et ouvre de grandes perspectives de recherche.

RÉSULTATS

La bilan est le suivant en regard des résultats qui étaient attendus :

1. Un **prototype de simulation** de la morphogenèse de la métropole d'un point de vue de sa matérialité : le moteur développé permet la simulation de la morphogenèse sur notre zone d'étude et peut être étendu à n'importe quelle zone, si toutefois les données de hauteur et de programmation existent. Les annexes ci-après proposent une vue détaillée de l'accomplissement des tâches et de l'avancement des développements informatiques.
2. Un **rendu visuel** de simulation de la morphogenèse sur la zone d'étude : le prototype permet de réaliser des animations Flash à partir des images en 2D extraites à chaque étape de la simulation. De plus un film est en cours de réalisation qui a pour objectif de présenter la démarche et les résultats de recherche, et devrait proposer un rendu plus parlant.
3. Le présent **rapport** présentant les résultats et les perspectives de recherche ouvertes de manière détaillée et exhaustive
4. Une série de **publications** (cf chapitre précédant)

CARACTERES INNOVANTS

SIMULATION DE LA VILLE DU POINT DE VUE DE SA MATERIALITE

Un état de l'art large sur la simulation urbaine a mis en évidence le fait que nous avons développé le premier système de simulation de la métropole d'un point de vue de sa matérialité (géométrie vecteur des bâtiments).

EQUIPE INTERDISCIPLINAIRE

Si nous voulons aujourd'hui avoir une chance de maîtriser un jour le développement de la métropole, il nous faut développer un outil qui intègre tout notre savoir tant architectural, que géographique, mathématique, informatique, physique, voire biologique. Notre équipe interdisciplinaire était composée :

- ✓ d'architectes urbanistes et de géomaticiens travaillant en étroite collaboration au sein du laboratoire UTA,
- ✓ de collaborations ponctuelles avec le laboratoire LaSIG, dirigé par le prof. François GOLAY, qui assurait la direction du doctorat S.I.G. du projet,
- ✓ et de chercheurs du laboratoire COGIT d'IGN qui nous apportait son expertise sur la modélisation agent vecteur multi-échelle de la ville.

Aucune étude sur l'urbain n'intègre à ce jour à notre connaissance toutes ces disciplines au sein d'un projet commun.

STRUCTURATION DE NOS CONNAISSANCES SUR LES LOIS DE MORPHOGENÈSE

Nous avons rédigé un recueil des lois de morphogenèse établi par structuration des connaissances des architectes, ce qui en soi est une première en son genre et qui nous a permis d'introduire ces lois dans le moteur de simulation.

NOUVELLE REPRÉSENTATION

L'étude de l'agencement spatial de la métropole nous conduit à proposer une nouvelle représentation abstraite de la ville (algébrique), et de plus nous offre la possibilité de considérer ces micros systèmes (les groupes et les systèmes urbains définis dans le cadre du doctorat de Jong-Jin Park).

De plus, la conception d'un modèle multi-échelle de la ville nous conduit à

D'autre part, l'approche proposée intègre la topographie 3D et les hauteurs de bâtiments pour une visualisation « réaliste » dynamique 3D de la morphogenèse de la métropole sur plusieurs années.

INTRODUCTION DES LOIS DE MORPHOLOGIE DANS LA MODÉLISATION DE LA VILLE

Les agencements spatiaux mis en évidence (les groupes et les systèmes urbains) sont introduits dans le moteur de simulation Agent comme de nouveaux acteurs qui participent potentiellement aux processus décisionnels.

De plus, cette étude des agencements spatiaux et de leur dynamique à différentes échelles de la ville apporte un enrichissement important aux modèles S.I.G. classiques qui pourrait intéresser d'autres applications.

APPROCHE MULTI ÉCHELLE

Nous considérons les processus de transformation des bâtiments et programmes eux-mêmes (formation, conservation, disparition, changement de fonction, désaffectation, ...) tenant compte de leur environnement à toutes les échelles : du local (le voisinage) au global (la métropole).

APPROCHE SYSTÉMIQUE

La démarche analytique traditionnelle (par équations différentielles) ne parvient pas à expliquer de manière satisfaisante les systèmes complexes, dont certains phénomènes ne sont pas décomposables sans perte d'information. La ville étant considérée comme un système complexe, il nous semble important, si on veut la modéliser de manière satisfaisante, de prendre en compte les interactions entre ses diverses composantes.

MÉTHODOLOGIE MULTI-AGENT VECTEUR

L'approche agent vecteur proposée n'a encore jamais été exploitée pour la simulation de la morphogenèse de la métropole. Le *vecteur* (modélisation géométrique qui reflète les formes irrégulières des bâtiments) nous apporte une modélisation précise des objets et de leurs relations topologiques, et supporte les lois de morphogenèse, tandis que le multi-agent nous permet de modéliser les interactions (communication/négociation) entre agents vecteurs qui constituent la ville.

DIFFICULTES

Nous avons développé un premier prototype de simulation de la morphogenèse en 2D qui tient compte des bâtiments, des routes, des rivières et des forêts. Les résultats obtenus sont prometteurs. Cependant il s'agit d'une première approche.

Ainsi les résultats actuels permettent une simulation grossière, mais pas pleinement réaliste de la métropole, ce qui permettrait une comparaison directe avec la réalité du modèle.

Les aspects de recherche à approfondir en regard des difficultés rencontrées sont les suivants :

DEGRÉ DE SATISFACTION

Nous avons vu que nous avons modélisé chaque loi sous la forme d'un degré de satisfaction (en pourcentage), permettant ainsi d'obtenir la satisfaction globale de chaque agent par une moyenne

pondérée. C'est une première approche pour ce projet qu'il conviendra de valider par les expériences de simulation sur divers sites.

GROUPES ET SYSTÈMES

Les nouvelles structures spatiales abstraites telles que la notion de groupe d'habitats ou de système urbain s'avèrent complexes à détecter. Nous avons établi une première approche de détection. Cependant cet aspect devrait faire l'objet d'un doctorat en géomatique afin de mettre en place une méthodologie formelle, intégrant les indicateurs 3D des bâtiments obtenues à partir des données LIDAR et permettant d'obtenir de meilleurs résultats.

ÉVÈNEMENTS, APPROCHE STOCHASTIQUE

Le processus mis au point est totalement déterministe : les localisations de plus fort degré de satisfaction sont systématiquement choisies; la formation des services se fait exactement à lorsque le seuil de somme des population nécessaire pour le service est atteint ; les fonctions de bâtiments disparaissent précisément lorsque l'espérance de vie est atteinte.

Le moteur de simulation doit être enrichi des événements (perturbations) telle qu'une implantation d'un grand programme. Il conviendra de réaliser de nouveaux tests en introduisant des règles avec probabilité de création de programmes (tels que complexe sportif, centre de congrès, gare, etc.), de changements de programmation, de changement des valeurs d'influence ou de stabilité des objets, avant de passer à une approche stochastique.

INTRODUCTION DES AUTRES ELEMENTS DE L'ENVIRONNEMENT

Un autre point important concerne l'ajout au modèle conceptuel des données des autres objets de l'environnement qui entrent en jeu dans les lois de morphogenèse et pour le rendu visuel, notamment la topographie pour le calcul de pente. Là encore les données LIDAR nous permettront d'obtenir des résultats suffisamment précis en comparaison des données (modèle de données numérique au 25'000) en notre possession qui présentent une résolution inadéquate.

Il conviendra également d'ajouter les autres réseaux tels que les réseaux de transports en commun (bus, tramway, etc.).

Nous discutons également de la nécessité d'ajouter un modèle numérique des nuisances sonores.

ANALYSES GEOSTATISTIQUES (SPATIAL DATA MINING)

Un autre moyen de découvrir les lois de morphogenèse consiste à explorer les bases de données historiques existantes. Peut-être pourrait-on également déduire des lois de probabilités des premiers résultats de simulation ?

Là encore cette étude pourrait faire l'objet d'un sujet de doctorat en SIG, conjointement avec l'architecture et les méthodes d'intelligence artificielle pour développer une méthodologie appropriée d'apprentissage supervisé pour l'exploration des lois de morphogenèse.

TEMPS DE CALCULS

Comme pour toute simulation, nous avons un problème important de performances. Les temps de calcul du prototype sont actuellement très longs, du fait des nombreux calculs de distances notamment.

L'école dispose d'une capacité de calcul liée à l'utilisation de CPU partagées. Il conviendra de tester ce principe dans le cadre d'un projet futur.

ECHELLES MESO ET MACRO

Nous avons déjà évoqué la difficulté de définir la notion de pièce urbaine. Est-ce un quartier ? Quels sont les critères qui définissent un quartier : l'homogénéité des objets le composant (implantation des bâtiments, unité entre eux : volumétrie, hauteur, forme, etc.), une identité (« esprit ») telle que définie en anthropologie, etc. ?

Ce sujet de recherche peut faire l'objet d'une thèse en géomatique qui comprendrait, outre la définition du quartier posée par le doctorant à l'architecture, la mise en place d'une méthodologie de détection et d'extraction automatique de ces structures nécessaire à l'opération d'agrégation durant la simulation.

De plus, les lois qui ont été énoncées concernent principalement l'échelle micro. Le travail d'exploration des lois à l'échelle méso et macro (doctorat de Jong-Jin Park en partie) devra également être modélisé pour la simulation.

CALIBRATION DU MODÈLE

Afin de progresser dans la conception du modèle Multi Agents, il est nécessaire de passer par la phase de calibration du modèle de simulation afin de valider formellement l'approche proposée.

Ce sujet de recherche pourra faire l'objet d'une thèse aux frontières entre géomatique, intelligence artificielle et Mathématiques.

VISUALISATION

Le rendu visuel que nous offrons à partir du prototype consiste en une animation flash réalisée à partir des images *Jpeg* des étapes de la simulation.

Ceci était suffisamment dans le cadre de cette recherche. A terme, la simulation devrait pouvoir être visualisée en 3D de façon dynamique.

De plus elle devrait intégrer les différentes échelles avec leurs représentations abstraites respectives. Ceci peut également faire l'objet d'une thèse en informatique (infographie ?).

PERSPECTIVES

Nous avons réalisé un premier « tour » du domaine de recherche qu'est la simulation de la morphogenèse de la métropole, en abordant les questions sur les lois de comportements dynamiques, la simulation Multi-Agents et la représentation multi-échelle.

Nous avons ainsi concrètement initié cet énorme chantier, qui dépassait nos moyens à disposition, et posé les bases pour la poursuite du travail de recherche.

Les résultats démontrent clairement qu'en y mettant les moyens, il est tout à fait possible de simuler la morphogenèse de la métropole.

En résumé, les perspectives majeures dégagées de ce projet sont les suivantes.

APPLICATIONS

Le prototype développé permet actuellement de donner des approches de simulation valides, bien que grossières, puisque l'ensemble des lois que nous avons modélisées ne reflète pas complètement la réalité qui est bien plus complexe d'une part, et que l'utilisation effective de l'outil passe d'autre part par une phase de validation du modèle sur différentes métropoles, ce qui n'a pas encore pu être abordé.

Ainsi l'outil développé pourrait d'ores et déjà être appliqué comme outil d'aide à la décision, en particulier pour la recherche de meilleure localisation de grands programmes (variantes principales d'emplacement rendues sous forme de périmètre restreint), ou encore comme outil de planification pour les professionnels de l'urbanisme et les pouvoirs politiques.

Pour aller plus loin sur la question des lois, les métropoles occidentales sont d'une complexité telle aujourd'hui qu'il s'avère délicat de procéder à la calibration du modèle à partir des données les constituants. Il pourrait être envisagé une étape intermédiaire dans cette recherche à long terme qui consisterait à appliquer notre outil sur des villes relativement plus « simples » tels que les villes du sud par exemple : Dakar, Bamako, etc. Une proposition de recherche appliquée est en cours d'étude.

SUJETS DE DOCTORAT

Concernant la poursuite des recherches dans le domaine, plusieurs sujets de doctorat se dégagent de ce premier projet de recherche sur la morphogenèse des métropoles, à la croisée de plusieurs disciplines, dont principalement :

IA, SIG, Architecture :	Apprentissage supervisé – méthodologie d’exploration des lois de morphogenèse
SIG, Architecture, Maths :	Développement d’algorithmes géomatiques d’extraction des structures spatiales nécessaires au modèle (groupes, systèmes urbains)
Maths, SIG, Architecture :	Géostatistiques et calibration du modèle
SIG, Infographie, Architecture :	Réflexion sur l’outil de visualisation dynamique 3D multi échelle et le couplage avec le SIG, et mise en œuvre

FÉDÉRATION DES THÉMATIQUES DE SIMULATION URBAINE

Ce travail de recherche devrait à terme être intégré au sein d’une approche globale sur la simulation de la morphogenèse des métropoles : travaux sur la simulation des risques liés aux facteurs environnementaux (inondations, tremblements de terre, etc.), simulation socio-démographique et socio-économique, simulation de transports, etc.

Nous avons constaté qu’un panel très large des recherches sur la simulation urbaine existe déjà au sein même de l’EPFL : travaux sur la simulation des risques liés aux facteurs environnementaux (inondations, tremblements de terre, etc.), simulation socio-démographique et socio-économique, simulation de transports, etc.

Nous sommes convaincus que l’intégration de ces différentes approches au sein d’une démarche holistique pourrait conduire l’EPFL à devenir un leader international dans le domaine de la recherche en simulation urbaine.

Ceci d’autant plus que la Suisse dispose des moyens financiers d’acquisition des données nécessaires à une recherche d’une telle ampleur : données cadastrales avec hauteur des bâtiments et aspects programmatiques (fonctions hébergées), données à différentes dates et données LIDAR en particulier.

Rédigé par Corinne Plazanet, chef de projet / 29.08.2008

12 Bibliographie

- [Alexander, 2005] Alexander Christopher. 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, 2002-2005
- [Alexander, 1987] Alexander Christopher. A new theory of urban design. New York : Oxford University Press. 1987
- [Alexander, 1979] Alexander Christopher. The timeless way of building. New York : Oxford University Press. 1979
- [Antonini et al, 2006] Antonini G. Bierlaire M., Weber M. Discrete choice models of pedestrian walking behavior. Transportation Research Part B: Methodological. Volume 40, Issue 8 , September 2006, Pages 667-687. 2006
- [Arentze et al, 2006] Arentze Theo A. Aloys W.J. Borgers, and Harry J.P. Timmermans. A Heuristic Method for Land-Use Plan Generation in Planning Support Systems. In Proceedings: 8th International DDSS Conference. Progress in Design & Decision Support Systems in Architecture and Urban Planning. 4-7 July 2006. Eindhoven University of Technology, The Netherlands. Jos P. van Leeuwen & Harry J.P. Timmermans Ed. pp. 135-151. 2006
- [Ascher, 2001] ASCHER François, *Les nouveaux principes de l'urbanisme*, L'aube/Poche essai, 2001
- [Autier, 2006] AUTHIER Jean-Yves, *Le quartier*, Paris : La Découverte, 2006
- [Badariotti, 2005] Badariotti Dominique. 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, septembre 2005. Pages 133-156. 2005
- [Barbuceanu et Fox, 1995] Barbuceanu, M., Fox, M. : COOL : A Langage for Describing Coordination in Multi-Agent Systems. Proc. Of the First International Conference on Multi-Agent Systems (ICMAS 95), San Francisco, 1995, pp.17-24.
- [Basquiat, 2004] Basquiat J.-P. La morphogenèse. Extrait du site Web: Automates Intelligents (<http://www.automatesintelligents.com/echanges/2004/jan/morphogenese.html>), Janvier 2004
- [Batty, 2005] Batty Michael. Cities and complexity : understanding cities with cellular automata, agent-based models, and fractals. Cambridge : MIT Press. 2005
- [Batty et Torrens, 2001] Batty M., Torrens P.M. Modeling Complexity: the Limits to Prediction. In CASA Working Paper 36, University College London, Centre for Advanced Spatial Analysis, London. 2001
- [Batty et al, 1999] Batty M., Dodge M. and Jiang B. GIS and Urban Design. In Stillwell F., and Scholter H. (Editors), Geographical Information and Planning, Springer-Verlag, Berlin. 1999
- [Batty et Jiang, 1999] Batty Michael, Jiang B. Multi-agent simulation: New approaches to exploring space-time dynamics within GIS. Technical Report 10, Centre for Advanced Spatial Analysis, University College London, April 1999.

- [Batty et Xie, 1994] Batty M., Xie Y. From cells to cities. *Environment and planning B* 21: 31-48. 1994
- [Batty et al, 1993] Batty M., Fotheringham, A.S. and P. A. Longley. *Fractal Geometry and Urban Morphology*. In N.S. Lam and L. De Cola (Eds.), *Fractals in Geography*, Prentice Hall, Englewood Cliffs (NJ). 1993
- [Batty, Longley, 1996] Batty Michael, Longley Paul. *Fractal Cities*. ISBN: 0124555705; (August 1994) Academic Press, London and San Diego 1996 394 pages. 1996
- [Benenson et al, 2005] Benenson I. Shai Aronovich, Saar Noam Let's talk objects: generic methodology for urban high-resolution simulation. In *Computers, Environment and Urban Systems* 29 (2005) 425-453
- [Benenson et Thorrens, 2004] BENENSON Itzhak, TORRENS Paul. *Geosimulation : Automata-based modeling of urban phenomena*. Chichester, England : John Wiley & Sons Ltd. 2004
- [Benenson et al, 2001] Benenson I., Aronovich, S., and Noam, S. OBEUS: Object-Based Environment for Urban Simulation. In *Proceedings of the 6th international conference on GeoComputation*, University of Queensland, Brisbane, Australia. 2001
- [Berger et Nouhaud, 2004] Berger Patrick, Nouhaud Jean-Pierre. *Formes caches. La ville*. Lausanne : PPUR (Presses Polytechniques et Universitaires Romandes). 221 pages. 2004
- [Boffet, 2001] Boffet, A.: *Méthode de création d'informations multi-niveaux pour la generalization cartographique de l'urbain*. Thèse de Doctorat soutenue en 2001. Université de Marne la Vallée (2001)
- [Borsboom et al, 2006] Borsboom-van Beurden J.A.M., van Lammeren R.J.A., Hoogerwerf T., and Bouwman A.A. 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*. 4-7 July 2006. Eindhoven University of Technology, The Netherlands. Jos P. van Leeuwen & Harry J.P. Timmermans Ed. ISBN-10 90-386-1756-9. ISBN-13 978-90-386-1756-5. pp. 85 - 95. 2006
- [Camper, 2007] CAMPER J-F., *Les nouveaux mondes: Mégalo poles*. Le Monde: Dossiers & Documents, N.369.Nov.2007
- [Caneparo et al, 2006] Caneparo Luca, Francesco Guerra, and Elena Masala. UrbanLab - Generative platform for urban and regional design. In *Proceedings: 8th International DDSS Conference. Progress in Design & Decision Support Systems in Architecture and Urban Planning*. 4-7 July 2006. Eindhoven University of Technology, The Netherlands. Jos P. van Leeuwen & Harry J.P. Timmermans Ed. ISBN-10 90-386-1756-9. ISBN-13 978-90-386-1756-5. pp. 235-251. 2006
- [Carbone et al, 2000] CARBONE, GROMOV et PRUSINKIEWICZ, *Pattern formation in Biology*, Vision and Dynamics, World Scientific, 2000
- [Couclelis, 1985] Couclelis H. Cellular Worlds: A Framework for Modelling Micro-Macro Dynamics. In *Environment and Planning A*, 17, pp.585-596. 1985
- [Darvas, 2007] DARVAS György, *Symmetry*, Basel : Birkhäuser, 2007
- [Devisch et al, 2006] Devisch O.T.J., Timmermans H.J.P., Arentze T.A., and Borgers A.W.J. 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*. 4-7 July 2006. Eindhoven

- University of Technology, The Netherlands. Jos P. van Leeuwen & Harry J.P. Timmermans Ed. ISBN-10 90-386-1756-9. ISBN-13 978-90-386-1756-5. pp. 185-200. 2006
- [Duchêne, 2004] Duchêne, C., Généralisation cartographique par agents communicants : le modèle Cartacom. Application aux données topographiques en zone rurale. Thèse de doctorat, Université Paris 6, 2004
- [Duchêne et Regnaud, 2002] Duchêne Cécile, Regnaud Nicolas. Le modèle AGENT. In Book : Généralisation et Représentation Multiple. Dir. Anne Ruas. Chap. 21, pp. 369-385. Eds Hermes. July 2002
- [Duchêne et al, 2001] Duchêne C., Cambier C., Ruas A. Mécanismes de coordination multi-agents pour la cartographie automatique. Actes des 9èmes Journées Francophones pour l'Intelligence Artificielle Distribuée et les Systèmes Multi-Agents, (JFIAD' 01, Canada/Montréal). pp. 331-334. 2001
- [Engelen et al, 1997] Engelen G., White R. and Uljee I. Integrating constrained cellular automata models, GIS and decision support tools for urban planning and policy-making. In Timmermans H. (ed.) Decision Support Systems in Urban Planning, E & FN Spon, London, pp.125-155. 1996
- [El hadouaj et al, 2001] El hadouaj S., Espié S., Drogoul A. Un modele de simulation de trafic base sur une architecture multi-agent. Actes de l'école d'intelligence artificielle, Mai 2001.
- [Ester et al, 1999] Ester M. Kriegel H.-P., Sander J. Knowledge Discovery in Spatial Databases. Invited paper at 23rd German Conf. on Artificial Intelligence (KI '99), Bonn, Germany, in: Lecture Notes in Computer Science, Vol. 1701, 1999, pp. 61-74. 1999
- [Ferber, 1997] FERBER Jacques. Les systèmes multi-agents : Vers une intelligence collective. InterEditions, ISBN 2-7296-0665-3. 1997
- [Ferrand, 2000] Ferrand N. Multi-reactive agents paradigm for spatial modelling. In Fotheringham, A. S., and Wegener, M. (eds.), Spatial Models and GIS: new potential and new models, GISDATA 7, Taylor & Francis, London, New York. 2000
- [Franhauser, 2003] FRANKHAUSER Pierre. Morphologie des villes émergentes en Europe à travers les analyses fractales. Besançon, Théma-Puca, Ministère de l'Équipement. 2003
- [Franhauser, 1994] FRANKHAUSER Pierre. La fractalité des structures urbaines. Paris, Anthropos et Economica, 291 p. 1994
- [Franhauser, 1991] FRANKHAUSER Pierre. Aspects fractals des structures urbaines. L'Espace Géographique, n° 1, pp. 45-70. 1991
- [Gimblett, 2002] Gimblett H. R. Integrating geographic information systems and agent-based technologies for modelling and simulating social and ecological phenomena. In Gimblett, H. R. (ed.) Integrating Geographic Information Systems and Agent-based Modelling Techniques for Simulating Social and Ecological Processes, A volume in the Santa Fe Institute Studies in the Science of Complexity, Oxford University Press. 2002
- [Hammam et al, 2007] Hammam, Y., Moore A., Whigham, P.: *The dynamic geometry of geographical vector agents*. Computers, Environment and Urban Systems, 31(5), 502-519 (2007)

- [Hammam et al, 2003] Hammam Y., Moore, A., Whigham, P. and Freeman, C. A vector-agent paradigm for dynamic urban modelling. In: The 15th Annual Colloquium of the Spatial Information Research Centre, 1-3 December 2003, Dunedin, New Zealand. 2003
- [Han et al, 1997] Han J., Koperski K., and Stefanovic N. Geominer: A system prototype for spatial data mining. In proceedings 1997 ACM-SIGMOD International Conference on Management of Data, pages 553-556, May 1997. 1997
- [Jiang et Gimblett, 2002] Jiang B., Gimblett, H. R. An agent-based approach to environmental and urban systems within geographic information systems. In Gimblett, H. R. (ed.) Integrating Geographic Information Systems and Agent-based Modelling Techniques for Simulating Social and Ecological Processes, A volume in the Santa Fe Institute Studies in the Science of Complexity, Oxford University Press. 2002
- [Kriegel et al, 2004] Kriegel H.-P. Pfeifle M., Schönauer S. Similarity Search in Biological and Engineering Databases. IEEE Data Engineering Bulletin, Vol. 27, No. 4, 2004, pp. 37-44. 2004
- [Kostof, 2004] KOSTOF Spirio, *The city shaped : Urban patterns and meaning through history*, NY :Bulfinch press, 2004
- [Labrou, 2001] Labrou, Y. : Standardizing Agent Communication. *Multi-Agent Systems and Applications*, 9th ECCAI Advanced Course, 3rd European Agent Systems Summer School (EASSS'01), Prague, 2001, Selected Tutorial Papers. M.Luck, V. Marik, O.Stepankova, R.Trapp, eds. LNAI n°2086, pp.75-97.
- [Lamy et al, 1999] Lamy S., Ruas A., Demazeau Y., Jackson J., Mackaness W., Weibel R. The application of Agents in Automated map generalisation. 19th Conférence de l'Association de Cartographie Internationale (ICA'99, Canada / Ottawa), p. 1225-1234. 1999
- [Lécureuil, 2001] Lécureuil Jacques, *La programmation urbaine*, Paris : Le Moniteur, 2001
- [Lefebvre, 1967] LEFEBVRE Henri, *Le quartier et la ville*, Paris : Cahier de l'I.A.U.R.P, Mars, 1967
- [Li et Yeh, 2000] Li X., Yeh, A. G. Modelling sustainable urban development by the integration of constrained cellular automata and GIS. In The International Journal of Geographic Information Science, Vol. 14, No. 2, p. 131-152. 2000
- [Ma et al, 2006] Ma Linda, Arentze Theo, Borgers Aloys, and Timmermans Harry. A Multi-Agent Model for Generating Local Land-Use Plans in the Context of an Urban Planning Support System. In Proceedings: 8th International DDSS Conference. Progress in Design & Decision Support Systems in Architecture and Urban Planning. 4-7 July 2006. Eindhoven University of Technology, The Netherlands. Jos P. van Leeuwen & Harry J.P. Timmermans Ed. ISBN-10 90-386-1756-9. ISBN-13 978-90-386-1756-5. pp. 153-168. 2006
- [Ma et al, 2005] Ma L., Arentze, T.A., Borgers, A.W.J. and Timmermans H.J.P. Alternative methods of causal inference in a multi-agent model of land use decisions under conditions of uncertainty. In Proceedings (CD-Rom) of the Computers in Urban Planning and Urban Management Conference, London. 2005
- [Ma et al, 2004] Ma L., Arentze, T.A., Borgers, A.W.J. and Timmermans H.J.P. Using Bayesian decision networks for knowledge representation under conditions of uncertainty in multiagent land use simulation models. In J.P. van Leeuwen and H.J.P. Timmermans (eds.) Recent Advances in Design and Decision Support Systems in

- Architecture and Urban Planning, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, p. 129-144. 2004
- [Malverti, 1997] MALVERTI Xavier et PINON Pierre, *La ville régulière : Modèles et tracés*, Paris : Picard, 1997
- [Morin, 1980] MORIN Edgar, *La méthode: 2. La vie de la vie*, Paris: seuil,1980
- [Plazanet et Silva, 2007] Plazanet, C., Silva, V.: *Vector Approaches to urban morphogenesis modelling*. Poster on 10th GeoComputation Conference, 3rd-5th September, Ireland (2007)
- [Plazanet et al, 1998] Plazanet Corinne, Nara Bigolin, Anne Ruas. Experiments with Learning Techniques for Spatial Model Enrichment and Line Generalization. In *GeoInformatica International Journal Issue 2(4)*. Kluwer Academic Publishers, The Netherlands. December 1998, pp. 315-333. 1998
- [Portugali, 2000] Portugali, J.: *Self-Organisation and the City*. Berlin : Springer-Verlag (2000)
- [Pumain et al, 1989] PUMAIN Denise, SANDERS Léna et SAINT-JULIEN Thérèse. *Villes et auto-organisation*. Paris : Ed. Economica, 1989
- [Ramat E., 2005] Ramat E. Introduction à la simulation : principaux concepts. Ecole thématique CNRS : Modélisations et simulations multi-agents de systèmes complexes pour les Sciences de l'Homme et de la Société: principes et méthodes de conception et d'usage. Ile de Porquerolles (var), 19-24. (<http://perso.univ-rennes1.fr/denis.phan/PorquerollesXAgents/cours/ericRamat.pdf>). Septembre 2005
- [Ruas, 2000] Ruas Anne. The role of meso objects for generalization. In *Proceedings 9th international Symposium on Spatial Data Handling, (SDH'00, Chine / Pékin)*, 3b.50. 2000
- [Rodrigues et al, 1997] Rodrigues, A., Grueau, C., Raper, J., and Neves, N. (1997), *Research on spatial agents*, In *Proceeding of the 3rd Joint European Conference on Geographic Information (JEC-GI 97)*, Vienna.
- [Rodrigues et al, 1998] Rodrigues, A., Grueau, C., Raper, J., and Neves, N. (1998), *Environmental planning using spatial agents*, In Carver, S. (ed.) *Innovation in GIS 5*, Taylor & Francis, London.
- [Sachs, 2007] SACHS Angeli (Curator), *Nature design : From inspiration to innovation*, Zurich : Lars müller publishers, 2007
- [Salingaros, 2005] Salingaros, Nikos A. *Principles of Urban Structure*. Techne Press, Amsterdam. 2005
- [Sanders, 2005] Sanders Lena. *Simulation des systèmes urbains*. Présentation PPT. Ecole thématique CNRS : Modélisations et simulations multi-agents de systèmes complexes pour les Sciences de l'Homme et de la Société. Porquerolles (var), 22 septembre 2005
- [Sauvy, 1972] SAUVY Jean et Simone, *L'enfant à la découverte de l'espace*, Casterman/Poche, 1972
- [Segaud, 2007] SEGAUD Marion, *Anthropologie de l'espace : Habiter, fonder, distribuer, transformer*, Paris : Armand Colin, 2007

- [Silva, 2008] Silva, V., Plazanet, C., Carneiro, C. Golay, F. *3D LIDAR data application for urban morphogenesis multi-agent vector based geosimulation*. Soumis à GEOG-AN-MOD 08 : Third International Workshop on Geographical Analysis, Urban Modeling, Spatial Statistics. Perugia, Italy. 30/6- 3/7 2008
- [Toshihiro et Yoshitsugu, 2006] Toshihiro Osaragi, Yoshitsugu Aoki. A Method for Estimating Land Use Transition Probability Using Raster Data - Considerations about apatial unit of transition, fixed state of locations, and time-varying probability. In Proceedings: 8th International DDSS Conference. Innovations in Design & Decision Support Systems in Architecture and Urban Planning. 4-7 July 2006. Eindhoven University of Technology, The Netherlands. Jos P. van Leeuwen & Harry J.P. Timmermans Ed.
- [Vanbergue et Drogoul, 2002] VANBERGUE Diane, DROGOUL Alexis. Approche multi-agent pour la simulation urbaine. Actes des 6èmes Journées CASSINI 2002, pages 95-112. 2002
- [Veron, 2006] VERON Jaques, *L'urbanisation du monde*, Paris : La découverte, 2006, p.104
- [Versteegh, 2005] VERSTEEGH P. Méandres. Penser le paysage urbain. Presses polytechniques et universitaires romandes, Architecture Essais, Lausanne. 2005
- [Waddell et Ulfarsson, 2004] WADDELL Paul, Gudmundur F. Ulfarsson. 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, 2004, pages 203-236. 2004
- [Waddell et al, 2003] WADDELL Paul, Alan Borning, Michael Noth, Nathan Freier, Michael Becke and Gudmundur Ulfarsson. Microsimulation of Urban Development and Location Choices: Design and Implementation of UrbanSim. In Networks and Spatial Economics, Vol. 3 No. 1, 2003, pages 43--67. 2003
- [Waddell, 2002] WADDELL Paul. UrbanSim: Modeling Urban Development for Land Use, Transportation and Environmental Planning. In Journal of the American Planning Association, Vol. 68 No. 3, Summer 2002, pages 297-314. 2002
- [Ward et al, 1999] Ward D. P., Murray, A. T., and Phinn, S. R. An optimized cellular automata approach for sustainable urban development in rapidly urbanizing regions. In Proceedings of the 4th international conference on GeoComputation, Marry Washington College, Fredericksburg, Virginia, USA. 1999
- [White et Engelen, 1993] White R., Engelen G. Cellular automata and fractal urban form: a cellular modeling approach to the evolution of urban land-use patterns. In Environment and Planning A 25:1175-1199. 1993
- [Wooldridge et al, 1995] Wooldridge M., Jennings, N. R. Intelligent agents: theory and practice. In Knowledge Engineering Review, vol. 10, no. 2. 1995
- [Zimmermann, 2006] Zimmermann Gerhard. 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. 4-7 July 2006. Eindhoven University of Technology, The Netherlands. Jos P. van Leeuwen & Harry J.P. Timmermans Ed.
- [Zwirn, 2006] ZWIRN Hervé P., *Les systèmes complexes : Mathématiques et biologie*, Paris : Odile Jacob, 2006
- [Zwolak, 2008] Zwolak, K., *Extraction of morphological indicators from georeferentiated data in urban area*. Projet de Master EPFL, Lab. LaSIG. Juillet 2008

Annexe 1 : Point sur les tâches prévues

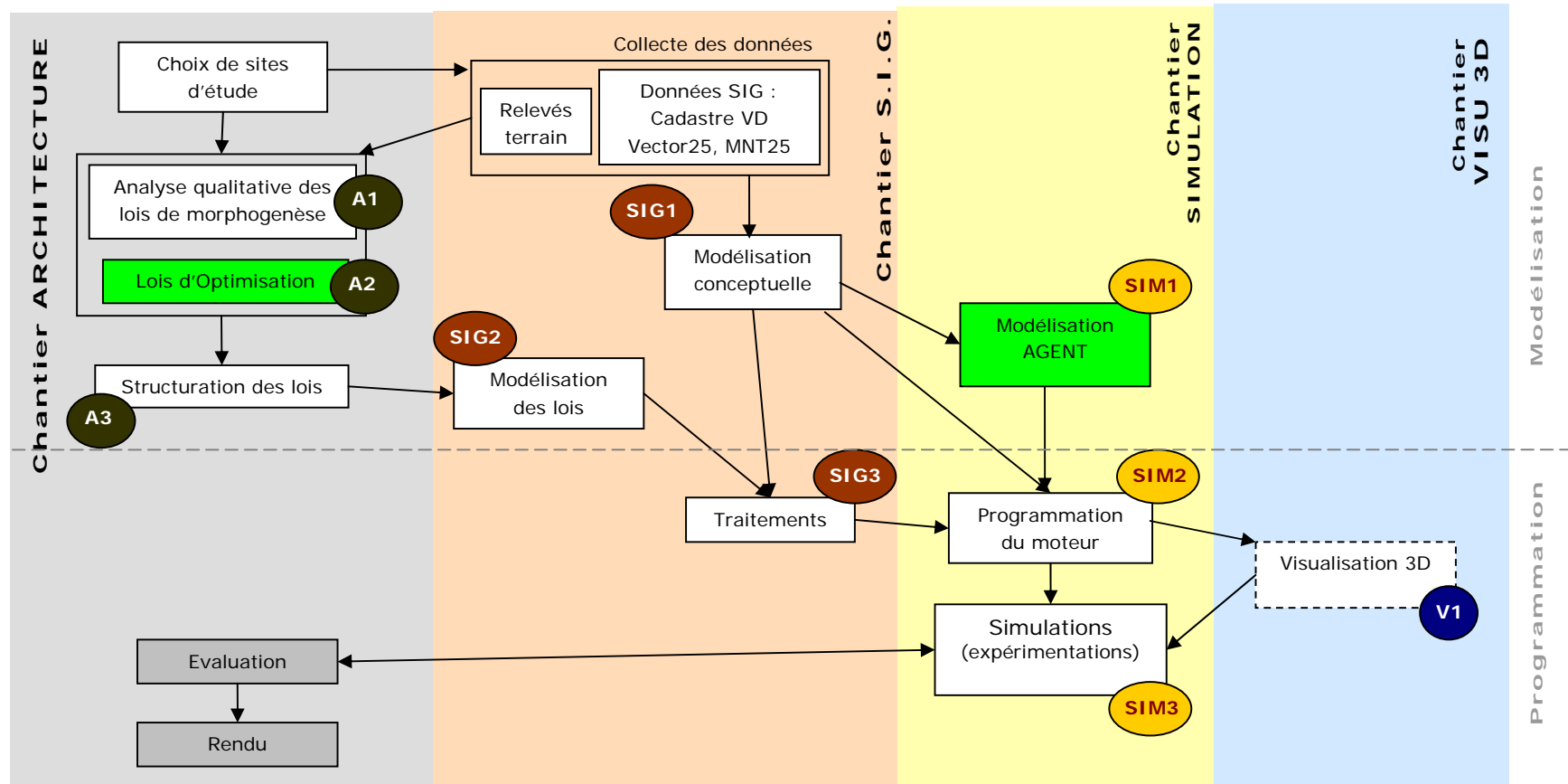


Schéma récapitulatif des tâches relatives à chaque chantier du projet

Tâches	Dénomination	Statut	Commentaire
A1	Enoncé des lois de morphogenèse	Ok	Nécessiterait un travail de recherche d'exploration de données (Spatial Data Mining). De plus les résultats de simulation permettront de valider l'exhaustivité des lois énoncées.
A2	Analyse des lois d'optimisation	En cours	Doctorat Jong-Jin Park
A3	Structuration des lois	En cours	Document en cours de finalisation
SIG1	Modélisation UML	Ok	Manque le sol
SIG2	Modélisation des lois	Ok	Manque la pente et l'ensoleillement
SIG3	Traitement des données	Ok	Groupes intégrés, demande recherche approfondie pour optimiser la détection. Ajouter ultérieurement les systèmes selon avancement JJP
SIM1	Modélisation AGENT	En cours	Doctorat Vitor Silva
SIM2	Programmation du moteur	En cours	D'autres scénarios en cours de programmation
SIM3	Expérimentations	En cours	Selon programmation du moteur
V1	Visualisation Java 3D	Non	Prévu dans l'hiver 2008 en collaboration avec Claudio Carneiro (doctorant LaSIG)

Annexe 2 : point sur les développements informatiques

Tâches	Etat actuel du prototype :		Effort * estimatif	Statut/Priorité	
	Manifold 2006	GeOxygene 2007			
Données	Données de base (Chavannes): Bâtiments, routes, rivières, forêts	OK	+ lac, TSOL, gares, ligne fer., ZA, communes	-	Ok
	Autres types : bus, ... / Autres régions : France 92...	non	?	?	2
Modélisation des lois	Voisinage	OK	Ok	- VS	Ok
	Influence fonctionnelle	OK selon le voisin le plus proche	+ Distinction selon fonctions (1/n voisins dans rayon) + distances selon itinéraires (/ vol oiseau)	30 VS	Ok
	Croissance : augmentation annuelle du nombre de logements	OK	OK	-	Ok
	Création de services en fonction de la croissance	OK	OK	10 VS	Ok
	Disparition des bâtiments en fin de vie	OK	OK	10 VS	Ok
	Vue	Non	Réalisé pour les bâtiments en début de simulation	40 CC	Partiel.
	Terrain (pente)	Non	Prévu en collaboration avec Claudio C. (LaSIG)	30 VS	1
	Sol : zones inondables, canalisations, ...	Non	Non	100	2
	Orientation (ensoleillement)	Non	Non	30	2
	Pouvoir symbolique	Non	Non	20	2
	Economie d'espace (potentiellement redondant avec influence fonctionnelle)	Non	Non	30	2
	Décroissance densité parcellaire	Non	Non	30	2
Autres lois étudiants atelier (vitesse, polycentrisme, ...)	Non	Non	?	2	
Stochastique	Événements, changements de valeurs, etc...	Non (déterministe)	Non. AJOUTER : changer valeurs aléatoirement	40 VS	En cours
Localisation	Calcul de la meilleure localisation en fonction de la satisfaction	Sur grille	Selon zone d'affectation adéquate et alignement à la route.	20 VS	A améliorer
Programmation	Programmation des bâtiments rectangle, orientation selon alignement à la route	Non orienté, standard	Forme variant, générée aléatoirement selon surface de la fonction. Orientation selon alignement à la route	20 CP	A améliorer
	Programmation de formes complexes	Non	Selon avancée doctorat JJP et disponibilité VS	40 CP	1
	Programmes (ensembles de bâtiments ou surfaces fonctions), sur la base des invariants optimaux JJP (lois morphologiques)	Non	Groupes, poursuivre avec les systèmes	100 CP	A poursuivre
Quartiers	Détection des quartiers et lois...	Non	Non	100	3
Surfaces fonctions	Prise en compte de plusieurs fonctions par bâtiment	Non	Non (en 2008 par thèse VS)	60	2
Agents	Désirs, comportements, décisions	Non	A améliorer	60 VS	1
	Communication	Non	Ok	40 VS	1
Calibration	Validation des lois sur les données existantes datées	Non	Non	100	2
3D	Volumes 3D des bâtiments	Non	Indicateurs 3D selon travail de master, non intégrés	40 CC	A intégrer
Rendu	- Génération d'images	OK	Non	10 30	2
	- Création d'animations Flash	Manuel	Non		2
				~ 4 ans	

Inclut les phases de recherche, développement, tests/validation, rédaction, et le « quotidien » : séances, conférences, cours, congés, etc.

Statuts: ok : / en traitement : / à suivre en priorité : / non réalisable avec ressources disponibles :