
Simuler les évolutions urbaines à l'aide de données géographiques urbaines 3D

Mickaël Brasebin* — **Sébastien Mustière*** — **Julien Perret*** —
Christiane Weber**

* *IGN, COGIT, Université Paris Est*

73 avenue de Paris
94 160 Saint Mandé
France

{prenom.nom}@ign.fr

** *Laboratoire LIVE*

3 rue de l'Argonne
67083 Strasbourg
France

{prenom.nom}@live-cnrs.unistra.fr

RÉSUMÉ. Comprendre et étudier les évolutions urbaines est important vis-à-vis des conséquences qu'elles peuvent entraîner. Pour appréhender ces phénomènes, la simulation urbaine basée agent est une des méthodes utilisées. Dans ce cadre, la disponibilité croissante des données 3D peut être mise au profit de la simulation afin d'avoir une connaissance plus fine des évolutions de la ville. Nous proposons une approche originale intégrant les données 3D et leur analyse combinées à l'usage des règles d'urbanisme lors des différentes étapes de simulation : la constitution de bases de données spatio-temporelles, la qualification de tissus urbains et la simulation du bâti. Une utilisation potentielle du simulateur pour l'aide à la détermination des paramètres de règles d'urbanisme est proposée.

ABSTRACT. Understanding and studying urban evolutions is important regarding their potential consequences. In order to apprehend such phenomena, agent based urban simulations can be used. In this context, the increasing availability of 3D urban data can be put to use for simulations so as to gain a finer understanding of urban evolutions. We propose a novel approach integrating 3D data and their analysis combined with urban regulation rules during the different steps of the simulation: the creation of spatio-temporal databases, the qualification of the urban fabric and buildings simulation. A potential application of such a simulator for the support of urban rules parameters choice is proposed.

MOTS-CLÉS : simulation, évolutions urbaines, SIG 3D, analyse spatiale, règles d'urbanisme.

KEYWORDS: simulation, urban growth, 3D GIS, spatial analysis, urban regulation

1. Introduction

La ville est un système dynamique dont les évolutions sont au centre de multiples préoccupations. [BAI 08] estime que chaque année 1% du parc immobilier est construit (environ 300 000 bâtiments) contre 0.1% détruit. Les préoccupations qui accompagnent les évolutions urbaines peuvent notamment être d'ordre sociales (accessibilité à l'emploi et aux équipements), économiques (attractivité du territoire ou du coût des logements) ou environnementales (qualité de l'air, réduction des émissions de CO₂, etc.). Il est important de comprendre ces dynamiques pour pouvoir évaluer leur impact futur afin de potentiellement le maîtriser. Dès lors, de nombreux travaux sont menés pour analyser les évolutions urbaines à différentes temporalités et différentes échelles en fonction des thématiques étudiées.

La simulation urbaine basée agents est une des méthodes employées pour reproduire les mécanismes d'évolution afin de développer ou vérifier la bonne connaissance de ces derniers ou d'en déceler d'autres. Lorsque les résultats de la simulation deviennent satisfaisants, il est possible d'extrapoler ces connaissances pour mettre en œuvre une démarche prospective afin d'étudier l'impact de différents scénarios (réglementaires, aménagements etc.) sur les évolutions de la ville et notamment sur ses évolutions morphologiques. Afin de pouvoir comparer la configuration des villes avant/après simulation, entre différentes temporalités ou entre les différents scénarios, il est nécessaire de définir une métrique permettant de les qualifier notamment à partir d'indicateurs urbains.

Les améliorations et la multiplication des techniques d'acquisitions de données permettent l'obtention de données de granularité de plus en plus fine et notamment des données 3D. Ces données offrent de nouvelles possibilités d'analyses à des échelles différentes de la zone urbaine au quartier. Les acteurs de la ville exploitent divers indicateurs à travers de nombreuses thématiques (thermiciens, aménageurs etc.).

L'objectif de cet article est de présenter une réflexion, menée par ailleurs dans le cadre d'une thèse de doctorat, sur les apports de l'utilisation des règles d'urbanisme dans le cadre de la simulation urbain. Afin de prendre pleinement en compte ces règles, l'utilisation de données 3D est indispensable. Par exemple, pour contraindre la visibilité vis-à-vis d'un monument historique ou d'un espace libre, l'usage de données 2D n'est pas toujours suffisant.

Dans un premier temps, une revue de littérature (*cf.* section 2) sur les différentes approches permettant de simuler l'évolution de la morphologie urbaine (*cf.* section 2.1) et sur les indicateurs morphologiques 3D (*cf.* section 2.2) sera l'occasion de discuter du positionnement de nos travaux(*cf.* section 2.3). Une proposition de méthodologie (*cf.* section 3), s'appuyant sur les apports potentiels des données 3D, sera ensuite présentée à travers les différents aspects de la simulation : constitution de bases de données 3D spatio-temporelles (*cf.* section 3.1), qualification du tissu urbain (*cf.* section 3.2) et simulation de l'évolution du tissu urbain (*cf.* section 3.3). Cette méthodologie sera ensuite discutée à travers les différentes problématiques rencontrées pour sa mise en œuvre (*cf.* section 3.5).

2. Revue de littérature et positionnement

2.1. *Les simulations des évolutions urbaines*

L'intérêt que suscite dans le domaine de la recherche la simulation des évolutions urbaines a permis l'émergence d'une multitude de systèmes notamment basés agents qui offrent des approches méthodologiques très variées. On peut noter tout d'abord différents points de vue dans la définition des agents. [BOU 99] a proposé une distinction entre les approches spatiales (qui simulent les changements d'occupation des sols [WHI 93]) et acteurs (qui simulent l'expansion urbaine du point de vue des acteurs du marché de l'immobilier [DEV 06]). Une manière simple de classer ces différentes approches est la manière dont l'espace est modélisé. On peut par exemple distinguer les modèles cellulaires et les modèles vectoriels.

Les modèles cellulaires, basés sur le principe du jeu de la vie ou du modèle de ségrégation de [SCH 71], consistent en une grille couvrant la zone géographique étudiée, un ensemble d'états caractérisant les cellules de la grille, un ensemble de voisinages d'une cellule, un ensemble de transitions qui détermine le changement d'état d'une cellule en fonction des cellules voisines et une séquence de pas temporels discrets lors desquels les états des cellules se mettent à jour [WHI 00]. Comme ces modèles cellulaires peuvent s'associer à des données de type raster, ils sont souvent utilisés pour modéliser les changements d'occupation des sols, pour en citer quelques uns : [WHI 00] au niveau des Pays-Bas, [DUB 03] avec le modèle SpaCelle au niveau de l'agglomération Rouennaise, [JAN 10] dans le cadre du projet Gigapolis comme application du modèle Sleuth [CLA 97, CLA 98] sur la baie de Chesapeake, etc. Les modèles cellulaires sont très utilisés du fait de la simplicité de leur mise en œuvre. Cependant, [HAM 03] note que les systèmes urbains étant particulièrement complexes, la représentation de ceux-ci dans des modèles cellulaires pour simuler les dynamiques urbaines est limitée et que les systèmes vecteurs agents sont une manière plus réaliste de modéliser le monde réel et ses processus.

Plus récents, les modèles vecteurs pour modéliser les évolutions urbaines sont aussi moins courants. Ils se basent sur les mêmes principes que les modèles cellulaires mais offrent plus de liberté au niveau de la modélisation de l'espace et une plus grande variété de relations de voisinage entre objets (Voronoi, réseaux etc.) [HAM 03, BAD 07]. Parmi les travaux de ce domaine, certains ont été appliqués pour le domaine vidéoludique. Par exemple, [WEB 09] a conçu un simulateur géométrique urbain interactif de villes pour peupler des environnements 3D divers en générant parcelles, rues, utilisation du sol, empreintes et volumes de bâtiments. Le système simule les évolutions en prenant en compte un modèle numérique de terrain, différents centres urbains, une simulation des prix de l'immobilier et du trafic. Des grammaires de formes [MUL 06] et des règles basiques d'urbanisme (hauteur maximale et recul à la route) sont utilisées pour générer le bâti. Cependant, les résultats ne sont pas croisés avec des données réelles, on parle alors de simulation géométrique. [SIL 10] propose une simulation du bâti et la génération d'équipements par rapport à des seuils de population. Le peuplement de l'espace urbain lié à l'influence de la proximité d'équipements et de

routes. La disposition du bâti est basée sur des lois morphologiques qui tendent à préserver des relations géométriques entre groupes de bâtiments basés sur [PLA 08]. Les bâtiments sont générés à partir d'inférences statistiques sur les propriétés des objets présents (orientation, surface, élongation, etc.). Plus récemment, le projet GeOpenSim [RUA 11] propose une simulation multi-échelle des évolutions urbaines en se concentrant sur les aspects morphologiques celle-ci se fait en fonction de la densité et du type de tissu des îlots (voir [PUI 10] pour la classification). Les îlots sont peuplés, en fonction d'une densité cible de bâti et d'un type de tissu [CUR 10].

Cependant, la distinction entre approche cellulaire et vectoriel n'est pas exclusive, il est possible de bénéficier des avantages des deux approches grâce au couplage de modèles. [ANT 08] fait par exemple cohabiter trois modèles dont un modèle multi-agents pour simuler la localisation et le déplacement de ménages et un modèle cellulaire pour l'occupation du sol.

Par ailleurs, d'après [CRO 10], la troisième dimension pour simuler les évolutions urbaines est surtout utilisée pour l'efficacité de ses capacités immersives afin que le public puisse mieux s'appropriier l'espace simulé. Ainsi, on peut noter des travaux dont le but est de proposer une visualisation 3D des résultats de simulations notamment à partir de modèles cellulaires d'occupation du sol [LAM 05] ou de ville [CAN 06] mais également d'empreintes vectorielles de bâtiments [WEB 09]. Ce type de résultat est principalement utilisé dans le cadre de concertations entre planificateurs et grand public pour discuter de différents scénarios d'aménagements et établir de nouvelles propositions [CAN 11, ISA 11].

Concernant les plateformes pour mettre en place ce type de processus, on peut noter l'extension de Repast¹ GeoGraph3D [DIB 04]. Si, ces outils servent avant tout à la représentation, excepté le relief, très peu d'utilisations sont réalisées dans le processus de simulation de données 3D ou d'outils d'analyse spatiale.

2.2. Indicateurs 3D morphologiques

De nombreuses méthodes se basant sur les géométries 3D de bâtiments ont été proposées pour caractériser l'espace urbain. Certains indicateurs concernent parfois les bâtiments eux mêmes, il peut s'agir de mesures de dimensions (volume, aire des surfaces extérieures, hauteur), de modélisation (complexité [GAN 10]) ou caractérisant la forme (compacité [CAR 10], déviation [GRA 08]). Si ces indicateurs concernent un bâtiment seul, il peut être possible de les agréger pour caractériser une zone choisie. Le choix de la zone permettant l'agrégation influe beaucoup sur la signification de l'indicateur calculé, comme on peut le constater avec les mesures de densité du tissu [IAU 05a] à travers ses nombreuses expressions [FOU 97, ADA 10]. Cette zone est nécessaire pour définir certains indicateurs, [ADO 01] a proposé des indicateurs environnementaux basés sur les géométries de modèles urbains simples pour mesurer l'impact du tissu sur la circulation du vent (rugosité et porosité), la transmission de

1. <http://repast.sourceforge.net/>

chaleur (contigüité entre bâti) ou l'évapotranspiration (minéralisation). D'autres indicateurs impliquent les relations entre objets comme la surface des murs adjacents avec d'autres bâtiments, les différences de hauteurs pour une parcelle ou l'angle sous lequel est vu un bâtiment depuis les bordures opposées de la voirie attenante. Une dernière catégorie d'indicateurs caractérise les espaces vides à partir de différents points de l'espace urbain pour mesurer l'ensoleillement [CAR 10], la visibilité d'un objet [FRA 00, RAM 03] ou l'ouverture de ciel [FIS 05] et les méthodes pour analyser les formes de ciel [CAR 10]. Ce dernier indicateur est utilisé aussi bien pour caractériser le ressenti [TEL 01] que pour quantifier l'effet d'îlot de chaleur urbain [SVE 04, UNG 09].

2.3. Positionnement de nos travaux

À notre connaissance aucun simulateur d'évolutions urbaines n'intègre la 3^e dimension dans les phases de simulation excepté lors de la visualisation (à l'exception de [SIL 10] déjà mentionné). Pourtant, l'intégration de la 3^e dimension aux différentes étapes de simulation permet d'étudier des phénomènes, en particulier environnementaux, pour lesquels la 3^e dimension doit être prise en compte. Dans le domaine de l'environnement, la simulation est effectuée manuellement en intégrant de futurs aménagements [BOU 09, ADA 10]. Cette approche est très efficace localement pour des sites choisis dont on connaît les futures configurations potentielles, mais ne peut s'appliquer à l'échelle de la ville.

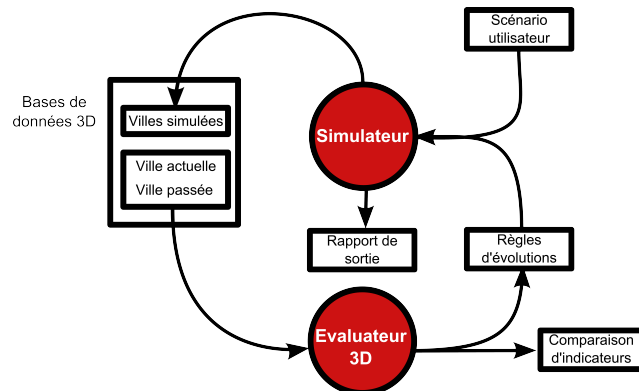


Figure 1 – Schéma de simulation proposé

Nos travaux s'inscrivent dans la conception d'un système de simulation spatial vectoriel 3D basé sur la morphologie du bâti dans lequel la composante 3D est exploitée à travers les différentes étapes de simulation. Nous considérons un système de simulation type (voir figure 1) composé d'une base de données urbaine (2D/3D) à différentes temporalités, qu'il faudra construire (*cf.* section 3.1). Un évaluateur doit permettre de comparer les valeurs d'indicateurs 2D/3D entre des bases de données à

différentes temporalités pour extraire des règles d'évolution ou entre différentes bases simulées ou réelles (*cf.* section 3.2). Ces bases simulées sont produites à partir de règles d'évolutions et d'un scénario utilisateur (*cf.* section 3.3) qui peuvent renvoyer en sortie des informations relatives à la simulation (*cf.* section 3.4).

Dans le cadre de nos travaux, une série de choix a été effectuée afin de mettre œuvre cette simulation 3D. Tout d'abord, nous avons choisi de nous baser sur la méthodologie de GeOpenSim et d'étudier les évolutions à partir de données topographiques 3D en centrant notre étude sur le bâti. Ce choix est justifié par le fait que les bases de données 3D ne contiennent généralement que le bâti et parce que leur verticalité influe de manière importante sur les configurations spatiales. Le niveau de détail choisi est le LOD2 (suivant la classification de CityGML®[KOL 03]), c'est le niveau de détail le plus courant dans les bases de données 3D. Concernant les règles d'évolution, nous les considérons en deux étapes. **La première étape** se déroule au niveau méso (l'îlot dans notre cas). Lors de celle-ci chaque objet choisit un état cible en fonction du contexte local et de méthodes de décision vers lequel la simulation les fait tendre. Cet état est décrit à travers un type de tissu et une densité bâtie. **La seconde étape** consiste à peupler les objets méso par des objets micro (par exemple, bâtiments dans notre cas) à partir de méthodes de peuplement. Ces méthodes ont pour but de reproduire l'organisation du bâti lors de la densification à partir des contraintes induites par l'état cible de l'objet méso. Dans le cadre de notre travail, nous utiliserons les règles d'urbanisme, notamment issues de PLU (ou de POS pour les dates les plus anciennes), pour réguler le peuplement. Le schéma figure 2 illustre les différentes étapes de la simulation de densification d'un îlot.

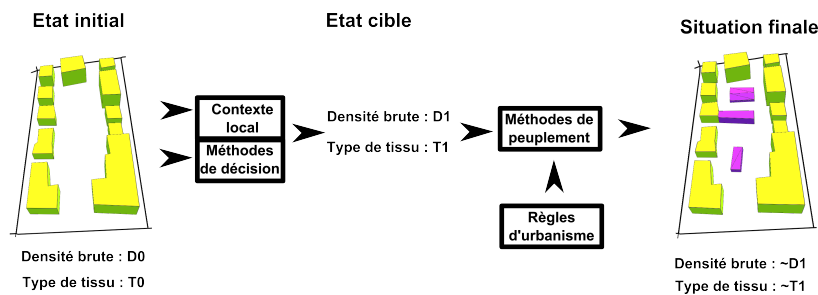


Figure 2 – Illustration de l'utilisation des méthodes de décision et de peuplement lors d'une simulation

Deux cas d'utilisation du simulateurs sont considérés :

– *Proposition de scénarios* : l'utilisateur fournit un scénario composé d'un ensemble de règles d'urbanisme et souhaite étudier les variations de valeurs d'un indicateur. Par exemple, il pourrait souhaiter mesurer la variation de la densité dans un quartier donné en fonction des règles de prospect ou de recul à la route. Ce type d'utilisation est l'occasion de simuler le rôle régulateur des règles dans le développement du tissu,

– *Génération de scénarios* : comme dans le premier type d'utilisation un ensemble presque infini de scénarios peut être défini, on propose ici d'inverser le problème et de générer un ensemble de valeurs paramètres de règles pour atteindre des valeurs souhaitées d'indicateurs (*cf.* section 3.4).

3. Propositions pour étudier les évolutions urbaines en 3D

3.1. Bases de données spatio-temporelles 3D

Les technologies classiques permettant de saisir en 3D la géométrie de bâtiments étant très récentes, il n'existe presque aucune base de données topographique 3D complète antérieure aux années 2000 (on pourra par exemple penser aux données TRAPU@[BOL 01]). On peut noter cependant de nombreux travaux dans le domaine de l'archéologie où l'on tente de modéliser des bâtiments en 3D à partir de diverses sources (descriptions, peintures, photographies anciennes, voir par exemple [ELH 01, STE 10]) mais cela ne permet généralement pas de couvrir qu'une petite zone géographique. Une phase de constitution d'une base de données 3D à des dates antérieures est donc nécessaire pour étudier les temporalités passées du point de vue de la 3^e dimension. Cependant, il est beaucoup plus aisé de constituer une base de données 2D en saisissant l'emprise de bâtiments à partir d'orthophotos ou de cartographies [RAV 08, RUA 11], qui sont des documents couvrant la totalité du territoire depuis au moins un siècle. Nous supposons qu'il est possible de s'appuyer sur de telles connaissances pour produire une base de données spatio-temporelle 3D. De telles bases de données spatio-temporelles sont en particulier intéressantes lorsqu'il s'agit de comprendre les comportements de construction à différentes périodes vis à vis des règles d'urbanisme. On pourra s'attacher à étudier leur respect, mais aussi la stratégie de construction, par exemple pour déterminer s'il s'agit en général d'une optimisation du volume (ou de la surface de plancher) construit par rapport aux contraintes réglementaires. À l'inverse, sans de telles bases, nous pourrions tester différentes hypothèses de simulation quant à cette stratégie de construction. Par ailleurs, nous n'avons aucune certitude à l'heure actuelle sur la continuité de telles stratégies. En particulier, il est possible que la sensibilisation aux enjeux environnementaux et au développement durable marque une rupture dans les habitudes de construction.

Notre méthode consiste à apparier l'emprise au sol d'une base de données 3D actuelle avec les emprises des bâtiments en 2D en essayant pour chaque bâtiment d'apparier des dates les plus récentes vers les dates les plus anciennes. L'opération est répétée jusqu'à ce que l'emprise n'existe plus ou qu'elle soit très modifiée. La difficulté de cette méthode est de réussir l'appariement 2D/3D malgré les différences de spécifications concernant notamment l'agrégation de bâtiments et la précision planimétrique. Cette méthode a deux inconvénients principaux : elle ne permet pas de détecter des modifications verticales (modification du toit ou ajout ou suppression d'étages) et ne permet pas de connaître la morphologie des bâtiments détruits sans l'apport d'informations complémentaires.

La figure 3 illustre des résultats sur un îlot de petite taille.

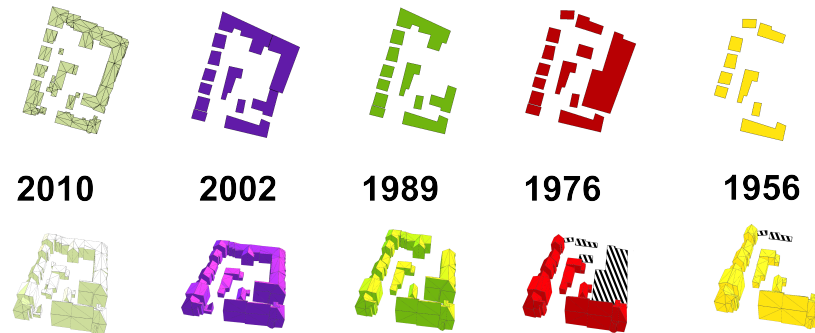


Figure 3 – Base de données temporelles 3D en partant de l'année 2010. Les bâtiments détruits avant cette date apparaissent sous la forme d'une empreinte hachurée.

Différentes méthodes peuvent être utilisées afin de reconstruire les bâtiments manquants :

– *Règles d'urbanisme* : dans ce cas, on génère la 3D en utilisant les informations contenues dans les POS et les PLU, en supposant que les règles sont bien respectées. On se retrouve dans la configuration où l'on souhaiterait peupler une zone en bâtiments avec une contrainte sur leurs emprises (cf. section 3.3),

– *Inférence statistique* : en mesurant des indicateurs morphologiques liés au bâtiment et grâce à des informations contextuelles (type de tissu urbain et période de construction), il s'agira d'inférer la morphologie 3D décrite à travers les indicateurs portant sur un bâtiment notamment la hauteur et la forme des toits. L'avantage de cette méthode est de ne nécessiter aucune connaissance a priori,

– *Données aériennes anciennes* : la reconstruction des bâtiments peut aussi être effectuée à partir de données aériennes du type BD ORTHO@Historique pour lesquelles la pose est estimée et des algorithmes de reconstruction 3D peuvent être utilisés [HAA 10],

– *Connaissances d'expert* : permettre à partir de connaissances sur des bâtiments particuliers (à partir de photos, témoignages, relevés topographiques, archives, permis de construire, base de données externe -comme la Base d'Informations Économiques Notariales-, etc.) de générer la troisième dimension.

3.2. Évaluer le tissu urbain le tissu urbain et ses évolutions

L'évaluation du tissu urbain intervient dans deux phases distinctes de notre processus : lors de l'extraction des méthodes de décision et lors de l'évaluation de bases de données simulées ou non. Cependant, ces deux phases sont semblables car il faut pouvoir comparer des états de bases de données différentes.

La phase d'extraction des méthodes de décision consiste à étudier les densités et les types de tissus à différentes dates et à extraire les changements de densités ou de type de tissu pour une zone donnée. Si la méthodologie d'étude des changements reste la même qu'en 2D, on peut s'attendre à ce que la modélisation 3D permette d'améliorer les résultats en termes de qualification du tissu. Par exemple, au niveau de la densité, la meilleure connaissance de la hauteur d'un bâtiment ou de la forme de son toit permette de mieux déterminer les surfaces de plancher. De plus, il sera intéressant de voir comment la classification des tissus proposée par [PUI 10] est modifiée ou améliorée en intégrant les indicateurs relatifs au 3D. Intuitivement, nous pouvons penser que la forme des toits pourra avoir un impact sur les résultats de classification. De plus, les calculs de densité effectués dans ce travail sont surfaciques, effectuer une classification à l'aide d'une densité volumique, mesure utilisable pour catégoriser les tissus urbains [IAU 05b], pourrait améliorer la classification.

Quant à la comparaison entre différentes bases de données simulées, elle sera l'occasion de faire intervenir des indicateurs et notamment ceux liés à l'environnement pour étudier comment ils évoluent à travers différents scénarios. Afin de couvrir un ensemble important d'indicateurs possibles et leurs agrégations, un modèle générique permettra d'intégrer des indicateurs en fonction des éléments qu'ils considèrent. Pour adapter la portée des indicateurs, des fonctions d'agrégations et d'échantillonnages sont proposées afin de produire un indicateur d'une portée globale et plus pertinente pour servir d'élément de comparaison. Pour les indicateurs concernant un bâtiment seul, les fonctions d'agrégation seront plutôt simples à mettre en œuvre car elles consisteront à prendre en compte les valeurs de l'indicateur sur la zone donnée (îlot, parcelle ou un polygone quelconque). Cependant, pour les indicateurs concernant un point de l'espace, comme par exemple l'indicateur d'ouverture de ciel, il est également nécessaire de définir des fonctions d'échantillonnage (sous forme d'un semis de points) pour construire des indicateurs plus globaux sur une zone donnée, comme par exemple l'ouverture de ciel moyenne sur un îlot.

3.3. *Peupler un espace en 3D*

Le processus de peuplement que nous considérons est présenté dans la figure 4. Une densité et un tissu cible sont affectés à l'îlot d'après les méthodes de décision. Si le tissu cible est très différent du tissu actuel, les bâtiments ne correspondant pas au tissu cible sont supprimés lors d'une phase préliminaire. Le type de tissu urbain évoluant, certains bâtiments caractéristiques d'un type de tissu particulier ne peuvent assurer de fonction adéquate dans le nouveau type de tissu. Un bâtiment industriel risque d'être détruit lorsque la zone dans laquelle se voit ouverte à une opération d'implantation d'habitats collectifs. Si la densité cible est inférieure à la densité actuelle, le peuplement de l'îlot par de nouveaux bâtiments est déclenché pour tendre vers la densité cible. Dans une première phase, il est nécessaire de sélectionner la parcelle qui accueillera le nouveau bâtiment. Pour cela, les volumes réglementaires en accord avec les règles du POS ou du PLU sont calculés. La prise en compte des

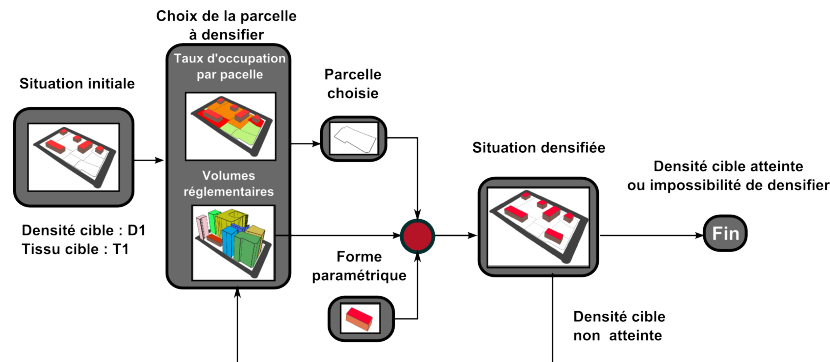


Figure 4 – Schématisation de la méthode de peuplement.

règles d'urbanisme pour générer des solides réglementaires est un sujet très étudié [ELM 87, FAU 01, SHE 10]. La parcelle à densifier est sélectionnée en fonction de critères permettant d'évaluer son attractivité. Outre des critères 2D courants (accessibilité au réseau de transport, distance au centre ville, aménités, etc.), de tels critères peuvent concerner le volume constructible disponible et la densité du bâti existant (les parcelles non ou peu bâties sont privilégiées par rapport aux autres). La seconde phase consiste à générer et placer le bâtiment sur cette parcelle. Le bâtiment proposé est généré à partir d'une bibliothèque de formes paramétriques 3D. Cette bibliothèque paramétrique est créée à partir de statistiques sur les bâtiments construits lors de la période considérée ou déterminée par l'utilisateur. Les paramètres que l'on compte considérer pour générer un bâtiment sont : les emprises des corps du bâtiment, les hauteurs maximales des différents corps et les formes des toits pour les différents corps. Les valeurs de ces paramètres sont contraintes de manière à générer un volume respectant les règles d'urbanisme. Différents travaux ont proposé d'utiliser les volumes réglementaires pour générer des bâtiments en 3D à l'aide d'un système multi-agents [BEL 10] ou à partir d'emprises 2D ou d'une forme 3D [BRA 11]. On peut noter que cette dernière méthode permet de générer des volumes à partir de l'empreinte de bâtiments et ainsi s'appliquer aux bâtiments détruits lors de la constitution de la base de données spatio-temporelle. Enfin, le positionnement du bâtiment sera fonction du respect du volume réglementaire, si il est impossible de placer le bâtiment généré du fait des règles d'urbanisme, celui-ci sera modifié (en jouant sur les différentes variables du modèle paramétré : hauteur, etc.) pour pouvoir être implanté ou une autre parcelle sera sélectionnée pour être densifiée. Le processus continue jusqu'à ce que la densité cible soit atteinte ou qu'il ne soit plus possible de densifier.

3.4. Proposition de règles

Cette étape intervient lorsqu'il s'agit de déterminer les paramètres d'un jeu de règles pour atteindre des valeurs souhaitées d'indicateurs ou en optimiser d'autres.

N'importe quelle métaheuristique peut être utilisée pour résoudre ce problème. Parmi les métaheuristicques utilisables, [KAM 10] propose un algorithme génétique dont le but est d'optimiser le volume du bâti tout en diminuant les pertes d'énergies cumulées dues au contact des surfaces des bâtiments avec l'extérieur. L'aspect génétique intervient lors de la génération des bâtiments, en effet, chaque bâtiment est porteur de gènes qui correspondent à sa hauteur et à la forme de son toit. Nous souhaitons reprendre cette idée de modéliser par un génome la configuration d'une ville, mais en faisant porter les gènes au niveau des règles d'urbanisme dont les valeurs des paramètres seraient ainsi des allèles (différentes versions d'un même gène). Cette technique permettra d'explorer l'espace des paramètres possibles des règles d'urbanisme. Pour mesurer l'adéquation d'une configuration conforme aux souhaits de l'utilisateur, une fonction de satisfaction prendra en compte des indicateurs à optimiser, des indicateurs dont on souhaite atteindre un certain intervalle de valeurs, des règles d'urbanisme fixées et des règles d'urbanisme dont les paramètres sont laissés libres. En retour, le système proposera un ensemble de valeurs pour les paramètres de règles laissés libres qui permettent de générer grâce au simulateur une configuration spatiale permettant d'atteindre les valeurs souhaitées pour les indicateurs définis en entrée. L'outil de simulation est utilisé pour générer des villes qui sont évaluées par la fonction de satisfaction. La figure 5 illustre ce processus à l'aide d'un exemple. L'utilisateur souhaite optimiser la surface habitable d'une zone tout en maintenant un indicateur d'ouverture de ciel élevé. Pour cela, il propose de jouer sur les paramètres d'angle de toit et de prospect tout en prenant en compte une hauteur maximale et un recul par rapport à la route.

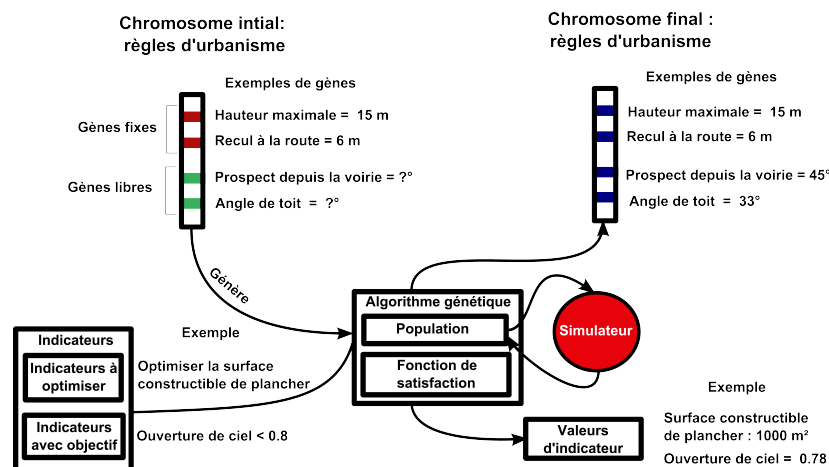


Figure 5 – Utilisation de l'algorithme génétique pour générer des propositions de règles.

3.5. *Discussions et mise en œuvre*

Nous avons proposé les principes d'un système de simulation d'évolutions urbaines intégrant la 3D. L'implémentation de ce système sera réalisée sur la plate-forme SIG GeOxygene et son module 3D [BRA 09] pour tout ce qui a attiré à la modélisation, l'analyse spatiale et la visualisation de données 3D. Le moteur de simulation GeOpenSim sera utilisé pour la modélisation et la classification de données spatio-temporelles ainsi que pour les mécanismes de simulation. Les zones étudiées se situent à Strasbourg où des données spatio-temporelles 2D ont été saisies lors du projet GeOpenSim à cinq temporalités différentes (1956, 1966, 1976, 1989 et 2002). Plusieurs questionnements s'ajoutent autour de cette mise en œuvre. Le premier concerne le niveau de détail des données 3D. Produire des données 3D nécessite un coût beaucoup plus important que pour des données 2D. La conséquence est qu'actuellement seules quelques agglomérations (parmi les plus importantes) sont couvertes par ce genre de bases de données au niveau de détail LOD2 ou LOD3 (en se basant sur la définition de [KOL 03], déjà citée). Quant au reste du territoire français, il est couvert par la BD TOPO® qui fournit une modélisation du bâti au niveau de la gouttière, c'est à dire un niveau de détail LOD1 (2D5). Ainsi, l'influence de la modélisation sur les résultats sera soigneusement étudiée afin d'évaluer la répétabilité et la pertinence de ce processus sur d'autres zones. Des études sur ce sujet sont actuellement en cours. De plus, il est important de fixer le niveau de détail des bâtiments générés par la simulation afin qu'ils correspondent à l'indicateur qui leur sera appliqué. Une autre question est la proposition d'un indice de fiabilité des résultats. En effet, lors des cas d'utilisation proposés, une multiplication d'incertitudes s'inscrit dans le résultat final (incertitudes dues à la modélisation, aux échantillonnages lors de l'agrégation d'indicateurs, erreurs de calcul, incertitudes temporelles, non unicité des solutions de peuplement...), il sera donc nécessaire de fournir des éléments sur la confiance à accorder aux résultats et d'étudier les variations des calculs d'indicateur en resimulant plusieurs fois le même scénario (on parle aussi de sensibilité des résultats aux données et aux modèles).

3.6. *Conclusion*

Dans cet article, nous avons présenté une revue de littérature sur la simulation des évolutions urbaines afin de positionner nos travaux relativement à l'existant. Nous avons proposé une approche pour étudier ces évolutions à l'aide de données 3D en évoquant les différentes possibilités de reconstruction de bases de données spatio-temporelles 3D et l'usage d'indicateurs 3D urbains pour qualifier le tissu. Nous avons également introduit une méthode basée sur l'usage des règles d'urbanisme pour simuler l'implantation de bâtiments et montré comment ce simulateur peut être utilisé pour déterminer l'impact de règles d'urbanisme.

Ce travail de thèse a pour but d'entrevoir de nouvelles possibilités en termes de conception de systèmes basés agents de simulation des évolutions urbaines en 3D. Il s'inscrit dans une démarche globale de réflexion sur l'utilisation des bases de données

spatiales 3D. Il permettra d'ouvrir l'analyse des évolutions urbaines à de nouveaux outils : les indicateurs 3D, en proposant une première utilisation de simulation 3D à travers la régulation par les règles d'urbanisme. Cet article est l'occasion de présenter les réalisations qui seront mises en œuvre lors de cette thèse à travers quatre problématiques : la constitution de bases de données, l'évaluation du tissu urbain, le peuplement en bâtiments d'un espace et la proposition de règles d'urbanisme. L'utilité du système final sera double : étude de l'influence de règles d'urbanisme et aide à la détermination de ces règles à partir d'indicateur. Si, à ce stade de notre réflexion, l'intérêt de la modélisation 3D dans les différentes phases de simulation n'est que théorique, une nécessaire comparaison avec le modèle 2D GeopenSim permettra de faire émerger des avantages à ce type de simulation, on peut notamment penser à une meilleure classification du tissu et une meilleure compréhension des configurations générées. Le système sera l'occasion de se questionner sur le contenu actuel des PLU. Au niveau d'une utilisation appliquée, dans un premier temps, un travail d'échanges avec la communauté urbaine de Strasbourg aura lieu pour échanger sur les possibilités d'utilisation pour la planification. Dans un second temps, on pourrait imaginer l'utilisation d'applications métiers 3D dans les phases d'évaluation du tissu pour permettre aux analystes de la ville de bénéficier de villes 3D vectorielles simulées.

3.7. Remerciements

Nous remercions la Communauté Urbaine de Strasbourg pour la mise à disposition de ses données dans le cadre de la convention ZAEU (Zone Atelier Environnementale Urbaine).

4. Bibliographie

- [ADA 10] ADAM M., « Densité : étude transversale de l'évolution de la forme urbaine d'un quartier de grands ensembles entre arguments environnementaux et perceptions habitantes. », Master's thesis, École Nationale Supérieure d'Architecture de Nantes, École Centrale de Nantes, École des Mines de Nantes et Université de Nantes, août 2010.
- [ADO 01] ADOLPHE L., « A simplified model of urban morphology : application to an analysis of the environmental performance of cities », *Environment and Planning B : Planning and Design*, vol. 28, n° 2, 2001, p. 183–200, Pion Ltd.
- [ANT 08] ANTONI J.-P., FRANKHAUSER P., « Modéliser différentes dynamiques à différentes échelles pour simuler la complexité des mobilités urbaines. L'exemple de MobiSim. », *XLVe colloque de l'ASRDLF*, août 2008.
- [BAD 07] BADARIOTTI D., BANOS A., MORENO D., « Influence of network metrics in urban simulation : introducing accessibility in graph-cellular automata. », *15TH European Colloquium on Theoretical and Quantitative Geography*, 2007.
- [BAI 08] BAIN P., MAUJEAN S., THEYS J., « Agora 2020, Vivre, habiter, se déplacer en 2020 : quelles priorités de recherche ? », rapport, 2008, MEEDDAT/DRAST.

- [BEL 10] BELKAID A., BEN SACI A., « Système multi-agents pour la fabrication de la forme urbaine », *JFSMA'10*, octobre 2010.
- [BOL 01] BOLDO D., « Fabrication conjointe de Modèles Numériques de Surface et d'ortho-images pour la visualisation perspective de scènes urbaines », PhD thesis, Université René Descartes – Paris V, Paris, France, juin 2001, Interne.
- [BOU 99] BOUSQUET F., GAUTIER D., « Comparaison de deux approches de modélisation des dynamiques spatiales par simulation multi-agents : les approches "spatiale" et "acteurs" », *Cybergeo : European Journal of Geography*, vol. [En ligne], n° 89, 1999.
- [BOU 09] BOUYER J., « Modélisation et simulation des microclimats urbains Etude de l'impact de l'aménagement urbain sur les consommations énergétiques des bâtiments », PhD thesis, Université de Nantes, 2009.
- [BRA 09] BRASEBIN M., « GeOxygene : An Open 3D Framework for the Development of Geographic Applications », *12th International Conference on Geographic Information Science (AGILE)*, juin 2009.
- [BRA 11] BRASEBIN M., PERRET J., HAËCK C., « Un système d'information géographique 3D pour l'exploration des règles d'urbanisme : Application à la constructibilité des bâtiments », *Revue Internationale de Géomatique*, vol. 21, n° 4, 2011, p. 533–556.
- [CAN 06] CANEPARO L., GUERRA F., MASALA E., « UrbanLab - Generative platform for urban and regional design », *proceedings of the 8th International DDSS Conference*, Eindhoven, NL, juillet 2006, p. 235–253.
- [CAN 11] CANEPARO L., « Cities Personal Foresights : A case study in Turin metropolitan area », *My Ideal City. Scenarios for the European City of the 3rd Millennium*, 2011, p. 46–63.
- [CAR 10] CARNEIRO C., MORELLO E., DESTHIEUX G., GOLAY F., « Urban environment quality indicators : application to solar radiation and morphological analysis on built area », *Proceedings of the 3rd WSEAS international conference on Visualization, imaging and simulation*, VIS '10, Stevens Point, Wisconsin, USA, 2010, World Scientific and Engineering Academy and Society (WSEAS), p. 141–148.
- [CLA 97] CLARKE K. C., HOPPEN S., GAYDOS L., « A self-modifying cellular automaton model of historical urbanization in the San Francisco Bay area », *Environment and Planning B : Planning and Design*, vol. 24, n° 2, 1997, p. 247–261, Pion Ltd.
- [CLA 98] CLARKE K. C., GAYDOS L. J., « Loose-coupling a cellular automaton model and GIS : long-term urban growth prediction for San Francisco and Washington/Baltimore », *International Journal of Geographical Information Science*, vol. 12, n° 7, 1998, p. 699–714, Taylor & Francis.
- [CRO 10] CROOKS A., HUDSON-SMITH A., PATEL A., « Building 3D Agent-Based Models for Urban Systems », *CASA Working paper 161*, novembre 2010.
- [CUR 10] CURIE F., PERRET J., RUAS A., « Simulation of urban blocks densification », *13th AGILE International Conference on Geographic Information Science*, mai 2010.
- [DEV 06] DEVISCH, TIMMERMANS H. J. P., ARENTZE T. A., BORGERS A. W. J., « Modeling Residential Search and Location Choice - Framework and Numerical Experiments », *proceedings of the 8th International DDSS Conference*, Eindhoven, NL, juillet 2006, p. 185–200.
- [DIB 04] DIBBLE C., FELDMAN P., « The GeoGraph 3D Computational Laboratory : Network and Terrain Landscapes for RePast », *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*,

- vol. 7, n° 1, 2004.
- [DUB 03] DUBOS-PAILLARD E., GUERMOND Y., LANGLOIS P., « Analyse de l'évolution urbaine par automate cellulaire : le modèle SPACELLE », *L'Espace géographique*, vol. 32, 2003, p. 357–378.
- [ELH 01] EL-HAKIM S. F., « A flexible approach to 3D reconstruction from single images », *SIGGRAPH '01 Sketches and Applications*, 2001.
- [ELM 87] EL MAKCHOUNI M., « Un système graphique intelligent d'aide à la conception des plans d'occupation des sols : SYGRIPOS », *12th Urban Data Management Symposium*, 1987.
- [FAU 01] FAUCHER D., « UrbanLab modélisation déclarative des enveloppes urbaines réglementaires », Thèse de doctorat, Université de Nantes, 2001.
- [FIS 05] FISHER-GEWIRTZMAN D., SHACH PINSKY D., WAGNER I. A., BURT M., « View-oriented three-dimensional visual analysis models for the urban environment », *Urban Design International*, vol. 10, n° 1, 2005, p. 23–37, Palgrave Macmillan.
- [FOU 97] FOUCHIER V., *Les densités urbaines et le développement durable : le cas de l'Île-de-France et des villes nouvelles*, Édition du SGVN, Paris, décembre 1997.
- [FRA 00] FRANKLIN W. R., « Applications of Analytical Cartography », *Cartography and Geographic Information Systems*, vol. 27, n° 3, 2000, p. 225–237.
- [GAN 10] GANITSEVA J., COORS V., « Automatic landmark detection for 3D urban models », *5th International Conference on 3D GeoInformation*, novembre 2010.
- [GRA 08] GRABLER F., AGRAWALA M., SUMNER R. W., PAULY M., « Automatic generation of tourist maps », *SIGGRAPH '08 : ACM SIGGRAPH 2008 papers*, New York, NY, USA, 2008, ACM, p. 1–11.
- [HAA 10] HAALA N., KADA M., « An update on automatic 3D building reconstruction », *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 65, n° 6, 2010, p. 570 - 580, ISPRS Centenary Celebration Issue.
- [HAM 03] HAMMAM Y., MOORE A., WHIGHAM P. A., FREEMAN C., « A Vector-Agent Paradigm for Dynamic Urban Modelling », p. 99–104, Citeseer, 2003.
- [IAU 05a] IAURIF, « Appréhender la densité : 2. Les indicateurs de densité », *Note Rapide sur l'occupation du sol*, vol. 383, 2005.
- [IAU 05b] IAURIF, « Appréhender la densité 3. Formes urbaines et densités », *Note Rapide sur l'occupation du sol*, vol. 384, 2005.
- [ISA 11] ISAACS J. P., GILMOUR D. J., BLACKWOOD D. J., FALCONER R. E., « Immersive and non immersive 3D virtual city : decision support tool for urban sustainability », *Journal of Information Technology in Construction*, vol. 16, 2011, p. 151–161.
- [JAN 10] JANTZ C. A., GOETZ S. J., DONATO D., CLAGGETT P., « Designing and implementing a regional urban modeling system using the SLEUTH cellular urban model », *Computers, Environment and Urban Systems*, vol. 34, n° 1, 2010, p. 1–16.
- [KAM 10] KAMPF J. H., MONTAVON M., BUNYESC J., BOLLIGER R., ROBINSON D., « Optimisation of buildings' solar irradiation availability », *Solar Energy*, vol. 84, n° 4, 2010, p. 596–603.
- [KOL 03] KOLBE T. H., GRÖGER G., « Towards unified 3D city models », *Challenges in Geospatial Analysis, Integration and Visualization II. Proc. of Joint ISPRS Workshop*, Stuttgart, 2003.

- [LAM 05] LAMMEREN R. J. A., MOMOT A., OLDE LOOHUIS R. J. W., HOOGERWERF T. C., « *Trends in real-time landscape visualization and participation* », chapitre 3D visualizations and 2D scenarios, Heidelberg : Wichmann, 2005.
- [MUL 06] MULLER P., WONKA P., HAEGLER S., ULMER A., VAN GOOL L., « Procedural modeling of buildings », *ACM Trans. Graph.*, vol. 25, n° 3, 2006, p. 614–623, ACM.
- [PLA 08] PLAZANET C., « Morphogenèse de la Métropole », *Projet de recherche interdisciplinaire EPFL. Rapport de recherche.*, EPFL, 2008.
- [PUI 10] PUISSANT A., LACHICHE N., BRAUD A., SKUPINSKI G., PERRET J., « Classification des tissus urbains à partir de données vectorielles - application à Strasbourg », *SAGEO 2010*, novembre 2010, p. 198–211.
- [RAM 03] RAMOS F., « Modélisation et Validation d'un Système d'Information Géographique 3D opérationnel », PhD thesis, Université Paris-Est, 2003.
- [RAV 08] RAVEAUX R., BURIE J.-C., OGIER J.-M., « Object Extraction from Colour Cadastral Maps », *DAS 08 Proceedings of the 2008 The Eighth IAPR International Workshop on Document Analysis Systems*, vol. 0, 2008, p. 506—514, IEEE Computer Society.
- [RUA 11] RUAS A., PERRET J., CURIE F., MAS A., PUISSANT A., SKUPINSKI G., BADARIOTTI D., WEBER C., GANCARSKI P., LACHICHE N., LESBEGUERIES J., BRAUD A., « Conception of a GIS-Platform to simulate urban densification based on the analysis of topographic data », *Advances in Cartography and GIScience. Volume 1*, Lecture Notes in Geoinformation and Cartography, p. 413–430, Springer Berlin Heidelberg, 2011.
- [SCH 71] SCHELLING T. C., « Dynamic models of segregation », *Journal of Mathematical Sociology*, vol. 1, n° May, 1971, p. 143–186, Routledge.
- [SHE 10] SHEN Z., KAWAKAMI M., « An online visualization tool for Internet-based local townscape design », *Computers, Environment and Urban Systems*, vol. 34, n° 2, 2010, p. 104–116.
- [SIL 10] SILVA V., « Conception et évaluation d'un prototype de simulation de la morphogenèse urbaine par agents vecteurs multi-échelles », PhD thesis, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, octobre 2010.
- [STE 10] STEFANI C., « Maquettes numériques spatio-temporelles d'édifices patrimoniaux : modélisation de la dimension temporelle et multi-restitutions d'édifices », PhD thesis, Arts et Métiers ParisTech, septembre 2010.
- [SVE 04] SVENSSON M. K., « Sky view factor analysis - implications for urban air temperature differences », *Meteorological Applications*, vol. 11, n° 3, 2004, p. 201–211, Cambridge Univ Press.
- [TEL 01] TELLER J., « La régulation morphologique dans le cadre du projet urbain. Spécification d'instruments informatiques destinés à supporter les modes de régulation performantiels », PhD thesis, Université de Liège, avril 2001.
- [UNG 09] UNGER J., « Connection between urban heat island and sky view factor approximated by a software tool on a 3D urban database », *International Journal of Environment and Pollution*, vol. 36, n° 1-2-3, 2009, p. 59–80.
- [WEB 09] WEBER B., MUELLER P., WONKA P., GROSS M., « Interactive Geometric Simulation of 4D Cities », *Computer Graphics Forum*, vol. 28, 2009, p. 481–492.
- [WHI 93] WHITE R., ENGELEN G., « Cellular automata and fractal urban form : a cellular modelling approach to the evolution of urban land-use patterns », *Environment and Planning A*, vol. 25, n° 8, 1993, p. 1175–1199, Pion Ltd.

[WHI 00] WHITE R., « High-resolution integrated modelling of the spatial dynamics of urban and regional systems », *Computers Environment and Urban Systems*, vol. 24, n° 5, 2000, p. 383-400.