

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

Mickaël Brasebin, Sébastien Mustière, Julien Perret, Christiane Weber

▶ **To cite this version:**

Mickaël Brasebin, Sébastien Mustière, Julien Perret, Christiane Weber. Simuler les évolutions urbaines à l'aide de données géographiques urbaines 3D. Revue Internationale de Géomatique, 2014, 24 (2), pp.159-180. 10.3166/RIG.24.159-180 . hal-03766228

HAL Id: hal-03766228
https://hal.science/hal-03766228

Submitted on 5 Sep 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

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

Mickaël Brasebin Sébastien Mustière Julien Perret
Christiane Weber

Résumé

Pour comprendre et étudier les évolutions urbaines, 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 spatiotemporelles, 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.

1 Introduction

La ville est un système dynamique dont les évolutions sont au centre de multiples préoccupations. de Viguerie (2006) 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 CO_2, etc.). Il est important de comprendre ces dynamiques pour pouvoir évaluer leur impact futur afin de 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. Par la simulation, 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.

Par ailleurs, les améliorations et la multiplication des techniques d'acquisition 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.). Par exemple, dans le domaine de l'environnement urbain, la troisième dimension est une composante importante pour intégrer les phénomènes solaires et aérauliques. Dans ce cadre, la simulation des évolutions urbaines est réalisée par l'intégration manuelle de futurs aménagements (Bouyer, 2009 ; Adam, 2010). 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.

L'objectif de cet article est de présenter une réflexion, menée dans le cadre d'une thèse de doctorat, sur les apports de l'utilisation des règles d'urbanisme dans le cadre de la simulation urbaine. 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. Cette réflexion est également l'occasion d'aborder les changements et les implications de l'usage de données 3D dans le cadre de la simulation des évolutions urbaines.

Dans un premier temps, une revue de littérature sur les différentes approches permettant de simuler l'évolution de la morphologie urbaine et sur les indicateurs morphologiques 3D sera l'occasion de discuter du positionnement de nos travaux. Une proposition de méthodologie, 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 spatiotemporelles, qualification du tissu urbain et simulation de l'évolution du tissu urbain. Cette méthodologie sera illustrée à travers quelques résultats préliminaires et ensuite discutée à travers les différentes problématiques rencontrées pour sa mise en œuvre.

2 Revue de littérature et positionnement

2.1 Simulation 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. Bousquet et Gautier (1999) ont proposé une distinction entre les approches spatiales (qui simulent les changements d'occupation des sols (White & Engelen, 1993)) et acteurs (qui simulent l'expansion urbaine du point de vue des acteurs du marché de l'immobilier (Devisch, Timmermans, Arentze, & Borgers, 2006)). 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 Schelling (1971), 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 (White, 2000). 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 : le modèle SpaCelle au niveau de l'agglomération rouennaise (Dubos-Paillard, Guermond, & Langlois, 2003), le modèle Sleuth (Clarke, Hoppen, & Gaydos, 1997 ; Clarke & Gaydos, 1998) dans le cadre du projet Gigapolis (Jantz, Goetz, Donato, & Claggett, 2010) sur la baie de Chesapeak, etc. Les modèles cellulaires sont très utilisés du fait de la simplicité de leur mise en œuvre. Cependant, les systèmes urbains étant particulièrement complexes, la représentation de ceux-ci dans des modèles cellulaires pour simuler les dynamiques urbaines est limitée, les systèmes vecteurs agents permettent de modéliser le monde réel et ses processus de manière plus fine (Hammam, Moore, Whigham, & Freeman, 2003).

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 [1] (Hammam et al., 2003 ; Badariotti, Banos, & Moreno, 2007). Parmi les travaux dans ce domaine, certains ont été appliqués pour le domaine vidéoludique. Par exemple, Weber, Mï¿½ller, Wonka, et Gross (2009) ont conçu un simulateur géométrique urbain interactif de villes pour peupler divers environnements 3D 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 et des règles basiques d'urbanisme (hauteur maximale et recul à la route) sont utilisées pour générer le bâti (Mï¿½ller, Wonka, Haegler, Ulmer, & Van Gool, 2006). Cependant, les résultats ne sont pas croisés avec des données réelles, on parle alors de simulation géométrique. Silva (2010) propose une simulation du bâti et la génération d'équipements par rapport à des critères de

1. Voronoï, réseaux, etc.

population. Le peuplement de l'espace urbain est lié à l'influence de la proximité d'équipements et de routes. La disposition du bâti est basée sur des lois morphologiques, telles que décrites par Plazanet (2008), qui tendent à préserver des relations géométriques entre groupes de bâtiments. Les bâtiments sont générés à partir d'inférences statistiques sur les propriétés des objets présents (orientation, surface, élongation, etc.). Plus récemment, le projet GeOpenSim (Ruas, Perret, Curie, Mas, & al, 2011) propose une simulation multi-échelle des évolutions urbaines en se concentrant sur les aspects morphologiques. Celle-ci est effectuée en fonction de la densité et du type de tissu des îlots classés suivant une méthodologie spécifique (Puissant, Lachiche, Braud, Skupinski, & Perret, 2010). Les îlots sont peuplés avec l'objectif d'atteindre une densité cible de bâti et un type de tissu (Curie, Perret, & Ruas, 2010).

Cependant, les approches cellulaire et vectorielle ne sont pas exclusives, il est possible de bénéficier des avantages des deux approches grâce au couplage de modèles. Antoni et Frankhauser (2008) font par exemple cohabiter trois modèles dont un modèle multi-agent pour simuler la localisation et le déplacement de ménages et un modèle cellulaire pour l'occupation du sol.

Par ailleurs, 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'approprier l'espace simulé (Crooks, Hudson-Smith, & Patel, 2010). 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 (Lammeren, Momot, Olde Loohuis, & Hoogerwerf, 2005), de villes (Caneparo, Guerra, & Masala, 2006) ou encore d'empreintes vectorielles de bâtiments (Weber et al., 2009). 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 pour établir de nouvelles propositions (Caneparo, 2011 ; Isaacs, Gilmour, Blackwood, & Falconer, 2011). Concernant les plateformes utilisées pour mettre en place ce type de processus, on peut noter l'extension de Repast [2] GeoGraph3D (Dibble & Feldman, 2004). Si ces outils servent avant tout à la représentation, les données 3D, à l'exception du relief, sont très peu utilisées dans les processus de simulation.

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 les bâtiments eux-mêmes, il peut s'agir de mesures de dimensions (volume, aire des surfaces extérieures, hauteur) ou de mesures caractérisant la forme comme la compacité (Carneiro, Morello, Desthieux, & Golay, 2010) ou la déviation (Grabler, Agrawala, Sumner, & Pauly, 2008). Si ces indicateurs concernent un bâtiment seul, il est possible de les agréger pour caractériser une zone choisie. Le choix de la zone permettant l'agrégation influe sur la signification de l'indicateur calculé, comme le montre les mesures de densité du tissu (IAURIF, 2005a). Par ailleurs, Adolphe (2001) a proposé des indicateurs environnementaux basés sur les géométries de modèles urbains pour mesurer l'impact du tissu sur la circulation du vent (rugosité et porosité), la transmission de chaleur (contigüité entre bâti) ou l'évapotranspiration (minéralisation). D'autres indicateurs impliquent

2. `http://repast.sourceforge.net/`

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 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 (Carneiro et al., 2010), la visibilité d'un objet (Franklin, 2000; Ramos, 2003), l'ouverture de ciel (Fisher-Gewirtzman, Shach Pinsly, Wagner, & Burt, 2005) ou les formes de ciel (Carneiro et al., 2010).

2.3 Positionnement de nos travaux

Nous constatons donc, d'une part, que les informations 3D fines sont peu utilisées dans les approches existantes de simulation et, d'autre part, que ces informations 3D sont riches pour analyser la ville. 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.

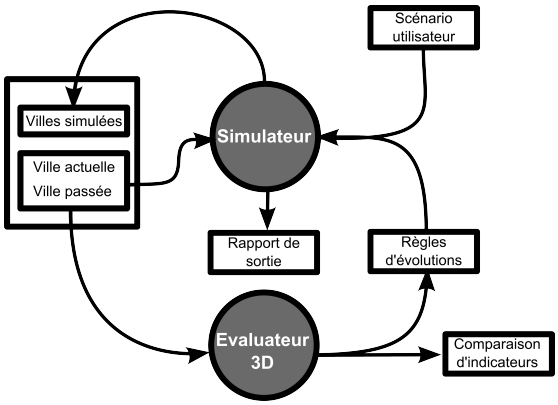


FIGURE 1 – Schéma de simulation considéré

Nous considérons un système de simulation type (figure 1) s'appuyant sur une base de données urbaine (2D/3D) à différentes temporalités, qu'il est nécessaire de constituer (*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 en œuvre cette simulation 3D. Tout d'abord, nous avons choisi d'étudier les évolutions à partir de données topographiques 3D en centrant notre étude sur les bâtiments. Ce choix est justifié par le fait que les bases de données 3D ne contiennent généralement que ce type d'objets, modélisés par une sémantique généralement pauvre et parce que la verticalité des géométries influe de manière importante sur les configurations spatiales. Concernant les règles d'évolution illustrées en figure 2, nous les considérons en deux étapes à l'instar de l'approche

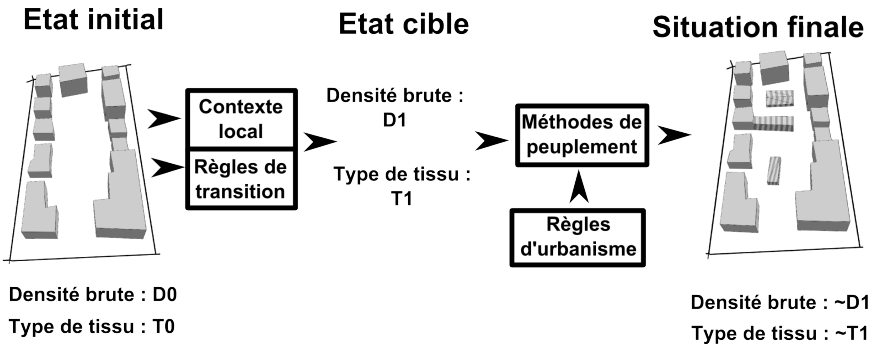


FIGURE 2 – Méthodes de décision et de peuplement lors d'une simulation

retenue dans le projet GeOpenSim (Ruas et al., 2011), pour la simulation de densification d'un îlot :

- **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 le fait tendre. Cet état est décrit à travers un type de tissu et une densité bâtie. Les méthodes de décision concernant ces éléments sont quant à elles extraites automatiquement à partir de l'analyse des tissus à différentes temporalités.
- **La seconde étape** consiste à peupler les objets méso par des objets micro (par exemple, peupler des îlots en 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 utilisons les règles d'urbanisme, notamment issues de PLU [3] (ou de POS [4] pour les dates les plus anciennes), pour réguler le peuplement. L'intérêt d'utiliser ce type de connaissances est qu'elles sont disponibles sur une majeure partie du territoire français (avec ses spécificités locales) et s'appliquent de manière tridimensionnelle sur la morphologie du bâti.

Deux cas d'utilisation du simulateur 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 il est long et difficile de trouver manuellement les paramètres de règles permettant de générer une configuration attendue en termes de valeurs d'indicateurs, nous proposons ici d'inverser le problème et de générer un ensemble de valeurs de paramètres de règles permettant d'atteindre des valeurs souhaitées d'indicateurs (*cf.* section 3.4).

3. Plan Local d'Urbanisme.
4. Plan d'Occupation des Sols.

3 Propositions pour étudier les évolutions urbaines en 3D

3.1 Bases de données spatiotemporelles 3D

Dans le cadre d'une simulation prenant en compte les tendances passées en termes de constructions, une phase de constitution d'une base de données 3D à des dates antérieures est nécessaire pour étudier ces temporalités du point de vue de la troisième dimension. Les technologies classiques permettant de saisir en 3D la géométrie de bâtiments étant récentes, il n'existe presque aucune base de données topographique 3D antérieure aux années 2000 (on pourra cependant penser aux données TRAPU® produite à partir de la fin des années 1970 par l'IGN). On peut noter aussi 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 ou plans-reliefs, voir par exemple (El-Hakim, 2001 ; Stefani, 2010 ; Hervy et al., 2012)) mais cela permet généralement de ne couvrir qu'une petite zone géographique. 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 (Raveaux, Burie, & Ogier, 2008 ; Ruas et al., 2011), 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 spatiotemporelle 3D. De telles bases de données spatiotemporelles 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 à ce que les contraintes réglementaires permettent. Néanmoins, sans de telles bases, il reste possible de tester différentes hypothèses de simulation quant à cette stratégie de construction, mais sans tenir compte des temporalités antérieures. 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, sujet pouvant être étudié avec la constitution de telles bases.

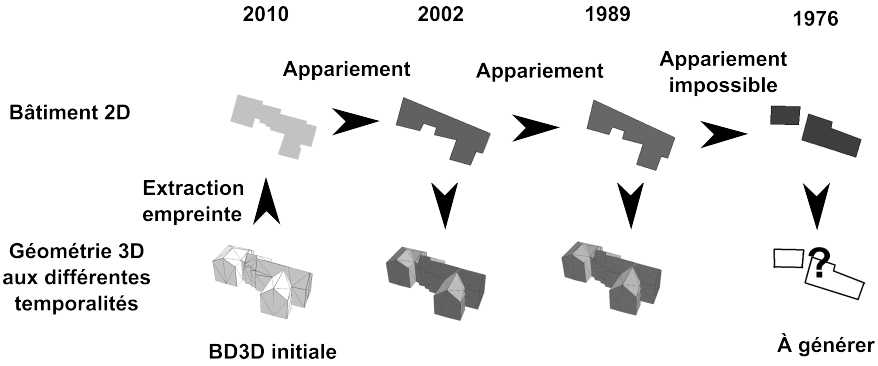


FIGURE 3 – Processus de génération de la base de données spatiotemporelle 3D

La méthode que nous envisageons pour constituer une BD historique 3D (figure 3), 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 limites principales : elle ne permet pas de détecter des modifications verticales (modification du toit, ajout ou suppression d'étages) et ne permet pas de connaître la morphologie des bâtiments détruits sans l'apport d'informations complémentaires. Des résultats sont présentés dans la figure 4 sur un îlot de petite taille.

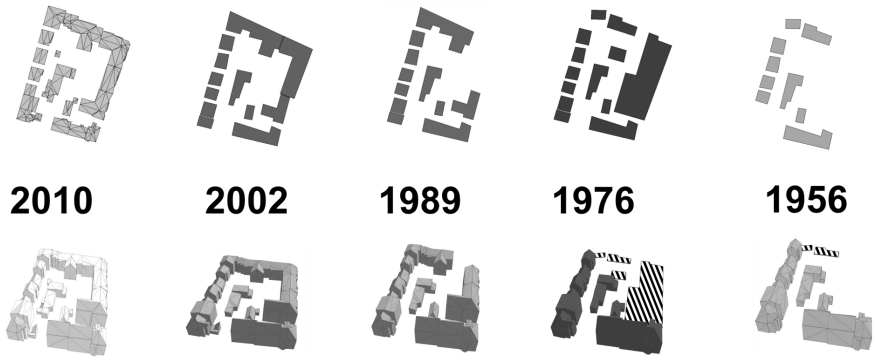


FIGURE 4 – Base de données temporelles 3D générée en partant de l'année 2010. Les bâtiments détruits avant cette date apparaissent sous la forme d'une emprise hachurée

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

- *Règles d'urbanisme :* dans ce cas, on génère la géométrie 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'agit 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 (Haala & Kada, 2010) ;
- *Connaissances d'expert :* la génération est effectuée à partir de connaissances sur des bâtiments particuliers (à partir de photos, témoignages, relevés topographiques, archives, permis de construire, base de données externe, telle la base d'informations économiques notariales, etc.) de gé-

nérer la troisième dimension.

3.2 Évaluer 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 est semblable à celles que l'on retrouve communément 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 permet de mieux déterminer les surfaces de plancher. De plus, il sera intéressant de voir comment une classification des tissus, telle que proposée par Puissant et al. (2010) à partir de données 2D, est modifiée ou améliorée en enrichissant la démarche d'indicateurs relatifs au 3D. Intuitivement, nous pensons que la forme des toits peut avoir un impact sur les résultats de classification. Par ailleurs, 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 (IAURIF, 2005b), pourrait effectivement 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 doivent être 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 simples à mettre en œuvre. 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 5. 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

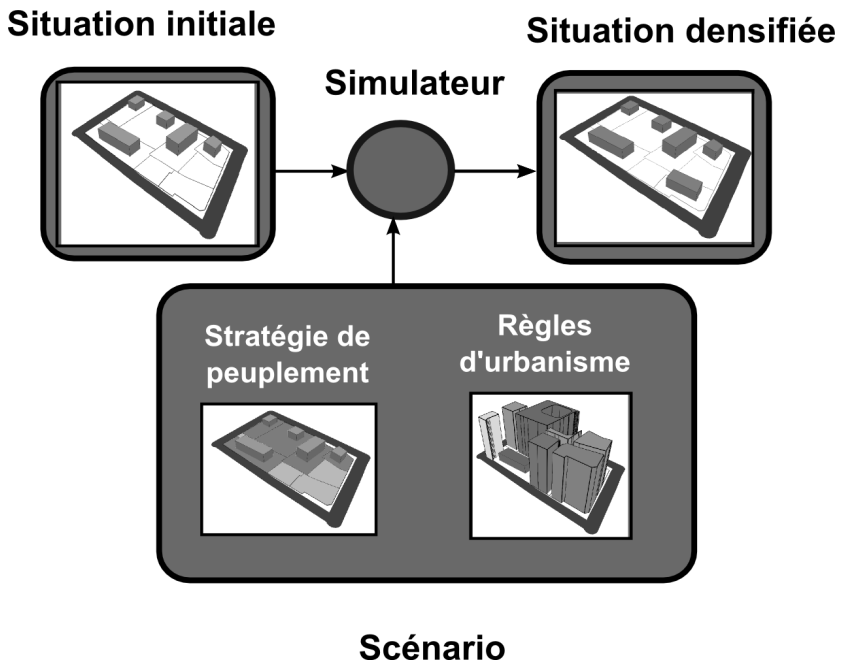


FIGURE 5 – Schématisation de la méthode de peuplement

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 règles d'urbanisme pour générer des solides réglementaires est un sujet très étudié (El Makchouni, 1987 ; Faucher, 2001 ; Shen & Kawakami, 2010). 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-agent (Belkaid & Ben Saci, 2010) ou à partir d'emprises 2D ou d'une forme 3D (Brasebin, Perret, & Haëck, 2011). Cette dernière approche enrichie par la considération des volumes paramétriques sera intégrée dans notre système. 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 spatiotemporelle. 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 métaheuristiques utilisables, 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 a retenu notre attention (Kampf, Montavon, Bunyesc, Bolliger, & Robinson, 2010). 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 une configuration urbaine, 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'urbanismes 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 configurations urbaines qui sont évalués par la fonction de satisfaction.

La figure 6 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. Ce genre de processus peut par exemple permettre de déterminer les valeurs des règles d'urbanisme qui garantissent un égal accès en termes de visibilité à un élément paysager, comme par exemple un lac.

3.5 Application

3.5.1 Données 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 plateforme SIG GeOxygene et son module 3D (Brasebin, 2009) pour tout ce qui a trait à la modélisation, l'analyse spatiale et la visualisation de données

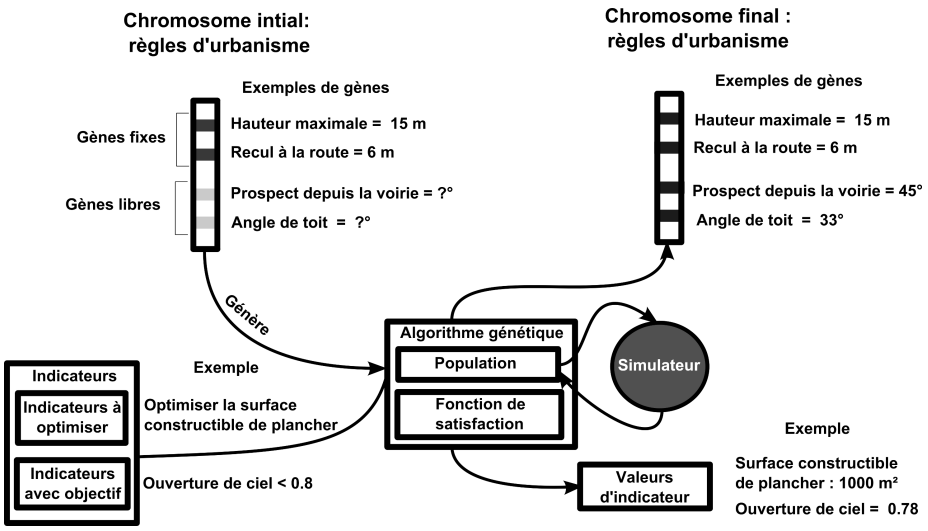


FIGURE 6 – Utilisation de l'algorithme génétique pour générer des propositions de règles

3D. Le moteur de simulation GeOpenSim sera utilisé pour la modélisation et la classification de données spatiotemporelles ainsi que pour les mécanismes de simulation. Les zones étudiées se situent à Strasbourg où des données spatiotemporelles 2D [5] ont été saisies lors du projet GeOpenSim à cinq temporalités différentes (1956, 1966, 1976, 1989 et 2002). Nous allons illustrer le processus global de simulation à l'aide d'analyses effectuées sur une des zones test du projet GeOpenSim. Ce choix est motivé par la disponibilité de données 3D. La base de données utilisée dans ce travail est fournie par la communauté urbaine de Strasbourg. Elle a été produite en 2010 et représente des bâtiments au niveau de détail LOD2.

La zone test compte 962 bâtiments modélisés en 3D. En appliquant le processus d'appariement 2D-3D, il s'avère que la base de données spatiotemporelle compte 194 bâtiments qui ont été détruits avant la date d'acquisition des données 3D. Parmi ces bâtiments, 7 seulement on été construits après 1956. Cela signifie que sur cette période, 80% des géométries 3D des bâtiments sont disponibles.

Ces informations spatiotemporelles 3D permettent d'analyser les évolutions morphologiques du bâti. La table 1 présente quelques résultats concernant la hauteur des maisons individuelles. Le faible nombre d'objets ne permet pas de tirer de tendances générales, la démarche mérite d'être reproduite sur des zones beaucoup plus conséquentes.

3.5.2 Illustrations du processus de simulation

Pour illustrer le processus de simulation, nous présentons deux expérimentations d'implantation de bâtiments basées sur le règlement du POS de Strasbourg (CUS, 2011).

5. Le détail des zones est présenté sur le site du projet GeOpenSim : `geopensim.ign.fr`

TABLEAU 1 – Informations sur la hauteur maximale (mesurée entre le point le plus bas jusqu'au sommet du faîtage) en mètres de maisons individuelles en fonction de la date d'apparition dans les bases de données spatiotemporelles (Min=minimale, Max =maximale). Le nombre est présenté à titre indicatif

	Année d'apparition du bâtiment				
Valeur (m)	1956	1966	1976	1989	2002
Min	1,88	3,22	4,34	3,76	2,84
Max	19,66	19,02	9,58	14,96	6,86
NB	206	27	12	5	3

Dans la première, nous proposons d'évaluer les bâtiments constructibles sur une parcelle vide (figure 7). L'idée est d'estimer le potentiel constructible de la parcelle afin d'en évaluer son prix ou son intérêt.

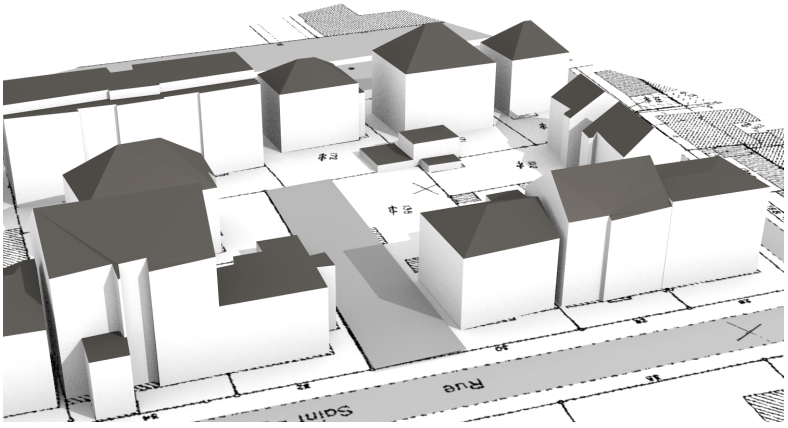
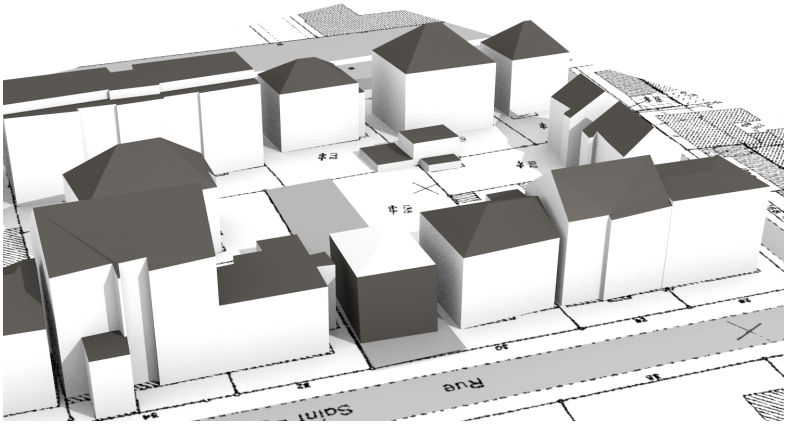


FIGURE 7 – Situation initiale avant implantation avec parcelle à construire en gris foncé

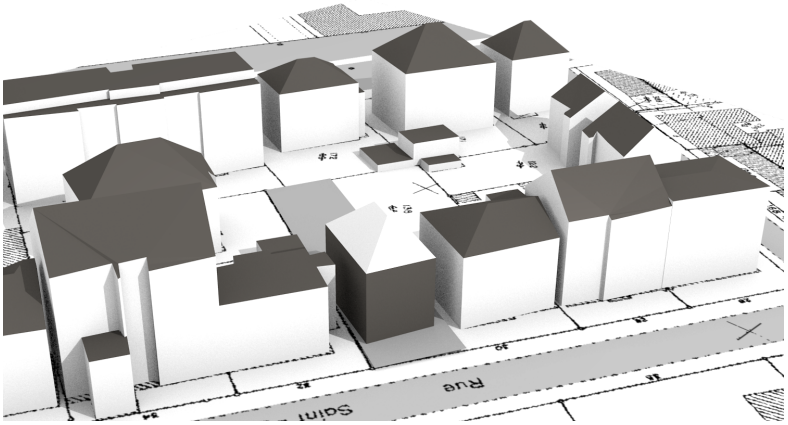
Pour la parcelle considérée, les règles suivantes du POS sont modélisées :
— $HauteurGouttiere(Batiment) \leq 12m$;
— $Distance(Batiment, Voirie) = 4m$;
— $Aire(Batiment)/Aire(Parcelle) \leq 0,5$;
— $Profondeur(Batiment) = 13m$;
— $Batiment.toit.angleMax < 45$.

Pour peupler cette parcelle, nous considérons deux scénarios (respectivement nommés scénario 1 et scénario 2), dans le premier nous considérons un constructeur qui cherche à optimiser l'emprise bâtie et dans le second, le volume. Dans les deux cas, il cherche à implanter un bâtiment ayant les caractéristiques suivantes :
— une forme rectangulaire ;
— un rectangle englobant dont les dimensions sont comprises entre 4 et 30m ;
— toit symétrique ;

— une hauteur à la gouttière entre 1 et 15 m ;
— une hauteur de toit [6] comprise entre 0 et 10m.



(a) Implantation avec optimisation de la surface construite



(b) Implantation avec optimisation du volume

FIGURE 8 – Bâtiments implantés suivant les deux scénarios (Les bâtiments implantés sont présentés avec un toit blanc et un corps de bâtiment gris)

Un proposition de résultat est présentée figure 8. Il s'agit ici d'un démonstrateur à portée illustrative : le résultat est le meilleur bâtiment obtenu après les générations aléatoires de 500 000 bâtiments. Le tableau 2 présente les caractéristiques des bâtiments simulés. Pour les deux scénarios, la solution idéale occupe la plus grande emprise possible. La longueur des bâtiments s'approche de la profondeur maximale autorisée par le règlement (13m) et la largeur des bâtiments de celle de la parcelle (environ 10m). Au niveau de la hauteur, seule l'approche optimisant le volume tente d'obtenir la valeur la plus élevée. La hauteur mesurée au niveau de la gouttière s'en rapproche, l'angle du toit est très proche de la valeur maximale autorisée par le POS (43,9° pour ce bâtiment). On peut noter que les bâtiments proposés semblent crédibles vis à vis du tissu

6. Hauteur mesurée entre le faîtage et la gouttière.

urbain environnant.

TABLEAU 2 – Caractéristiques des deux bâtiments

	Scénario	
	Surface construite (1)	**Volume (2)**
Largeur (m)	8,5	8,3
Longueur (m)	12,1	12,1
Hauteur Max (m)	11,7	14,2
Hauteur Gouttière (m)	9,6	10,2

L'autre expérience pour valider notre approche de simulation consiste à la confronter aux bâtiments réellement construits. Dans ce cadre, nous proposons de simuler la construction d'un bâtiment (les archives de la Communauté Urbaine de Strabsourg) édifié entre 2002 et 2008, d'après les données spatiotemporelles et donc soumis au POS actuel (figure 9).

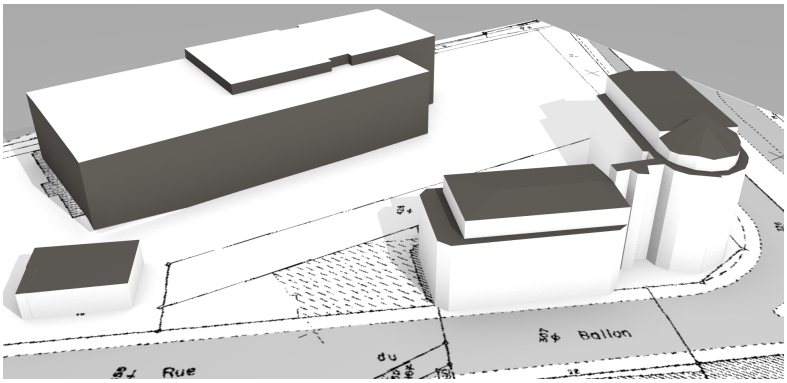


FIGURE 9 – Bâtiment tel qu'il est construit

Pour générer ce bâtiment, les règles d'urbanisme suivantes ont été intégrées dans le processus de génération :

— $HauteurGouttiere \leq 28m$
— $Aire(Batiment)/Aire(Parcelle) \leq 0,5$
— $Distance(Batiment, Parcelle.LimiteFond\&Parcelle.LimiteLaterale) \geq 6m$
— $Hauteur(Batiment.points) \leq 0,5 * Distance(Batiment.points, Parcelle.LimiteFond\&Parcelle.LimiteLaterale)$

Le scénario d'implantation choisi est le suivant :

— Emprise rectangulaire dimensions entre 0 et 100m ;
— Toit plat de hauteur entre 0 et 28m ;
— Optimisation du volume.

Le bâtiment simulé (figure 10) après 500 000 générations occupe un emplacement relativement similaire au bâtiment réel. Cela est d'autant plus intéressant que le scénario ne comporte pas de contrainte obligeant à positionner le bâtiment contre la voirie. L'explication vient de la dernière règle qui permet à un

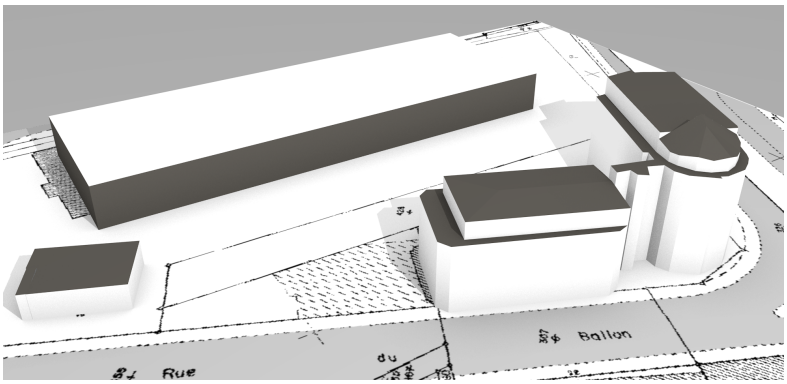


FIGURE 10 – Bâtiment tel que nous l'avons simulé

bâtiment d'être plus haut si il est implanté plus loin des limites séparatives arrières et latérales de la parcelle. Par ailleurs, les largeurs des deux bâtiments sont semblables, mais les hauteurs sont très différentes. En effet, le bâtiment simulé est plus long car les données que nous possédons n'intègrent pas la voie privée sur la partie droite de la parcelle construite pour desservir le bâtiment. La différence de hauteur s'explique quant à elle en partie par le fait que le bâtiment réel est composé de deux portions de toit, mais également parce qu'il comporte sur son toit des équipements techniques qui rehausse son gabarit (tolérés à hauteur de 2.5 dans le POS de Strasbourg). Les caractéristiques de ces bâtiments sont synthétisées dans le tableau 3.

TABLEAU 3 – Caractéristiques du bâtiment existant et du bâtiment simulé

	Bâtiment existant	**Bâtiment simulé**
Largeur (m)	33,4	32,2
Longueur (m)	85	92,26
HMax (m)	16,74 (partie haute) 14,19 (partie basse)	9,13

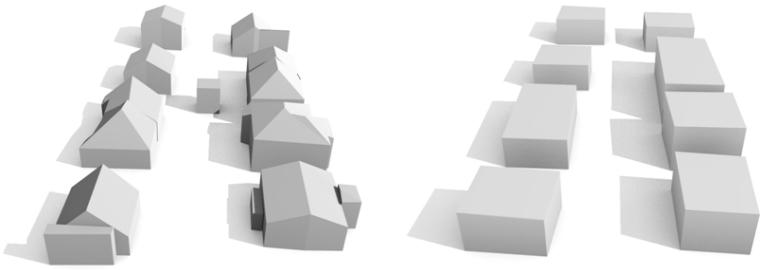
4 Conclusion

Dans cet article, nous avons proposé une approche pour étudier les évolutions urbaines à l'aide de données 3D en évoquant les différentes possibilités de reconstruction de bases de données spatiotemporelles 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. Cette méthode a été illustrée à l'aide de deux exemples présentant des résultats préliminaires de travaux en cours.

Plusieurs questionnements s'ajoutent à cette mise en œuvre. Le premier concerne l'implémentation d'une méta-heuristique efficace. Les résultats présentés ici servent d'illustration pour montrer comment ce genre de simulation

3D peut produire des résultats. La mise en œuvre de méthodes efficaces d'optimisation est une étape en cours dans le cadre du travail de thèse.

Le second 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 Gröger et Plümer (2012). 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. La figure 11 présente les bâtiments modélisées par deux bases différentes : les emprises des bâtiments diffèrent, certains sont absents et les hauteurs ne sont pas les mêmes. Ces différences de modélisation influent grandement sur les calculs d'indicateurs ou leur intégration au sein du processus de simulation. 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 aux indicateurs appliqués.



(a) Base de données 3D (b) BDTopo ®

FIGURE 11 – Un même îlot modélisé en 3D dans deux bases différentes

Une autre question qui n'a pas été abordée, puisqu'elle ne concerne pas directement la 3D, est celle des évolutions des parcelles. Dans nos travaux, nous considérons le regroupement et la division parcellaire. La première solution est de rendre cette opération manuelle. Une possibilité automatique sera offerte de fusionner des parcelles contigües si une parcelle non bâtie ou très peu bâtie se retrouve dans l'incapacité de se densifier dans un contexte donné. Cela peut être le fait de règles d'urbanisme trop contraignantes ou d'inadéquation entre la surface de la parcelle et le tissu dans lequel elle se trouve (nécessité d'avoir de grandes parcelles pour accueillir des bâtiments industriels). Inversement la division sera effective en cas de parcelles trop imposantes par rapport au bâti qu'elles contiennent. La division sera effectuée en conservant des contraintes notamment d'accès à la route.

Une dernière question est la proposition d'un indice de fiabilité des résultats. En effet, dans les 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).

Références

Adam, M. (2010). *Densité : étude transversale de l'évolution de la forme urbaine d'un quartier de grands ensembles entre arguments environnementaux et perceptions habitantes.* (Mémoire de Master non publié). École Nationale Supérieure d'Architecture de Nantes, École Centrale de Nantes, École des Mines de Nantes et Université de Nantes.

Adolphe, L. (2001). A simplified model of urban morphology : application to an analysis of the environmental performance of cities. *Environment and Planning B : Planning and Design*, *28*(2), 183–200.

Antoni, J.-P., & Frankhauser, P. (2008). Modéliser différentes dynamiques à différentes échelles pour simuler la complexité des mobilités urbaines. L'exemple de MobiSim. In *Actes du XLVe colloque de l'ASRDLF.* Rimouski, Canada.

Badariotti, D., Banos, A., & Moreno, D. (2007). Influence of network metrics in urban simulation : introducing accessibility in graph-cellular automata. In *Proceedings of 15TH European Colloquium on Theoretical and Quantitative Geography.* Montreux, Suisse.

Belkaid, A., & Ben Saci, A. (2010). Système multi-agents pour la fabrication de la forme urbaine. In *Actes de JFSMA'10.* Mahdi, Tunisie.

Bousquet, F., & Gautier, D. (1999). Comparaison de deux approches de modélisation des dynamiques spatiales par simulation multi-agents : les approches "spatiale" et "acteurs". *Cybergeo : European Journal of Geography*(89).

Bouyer, J. (2009). *Modélisation et simulation des microclimats urbains Etude de l'impact de l'aménagement urbain sur les consommations énergétiques des bâtiments* (Thèse de doctorat non publiée). Université de Nantes.

Brasebin, M. (2009). GeOxygene : An Open 3D Framework for the Development of Geographic Applications. In *Proceedings of 12th AGILE International Conference on Geographic Information Science.* Hannover, Germany.

Brasebin, M., Perret, J., & Haëck, C. (2011). Un système d'information géographique 3D pour l'exploration des règles d'urbanisme : Application à la constructibilité des bâtiments. *Revue Internationale de Géomatique*, *21*(4), 533–556.

Caneparo, L. (2011). Cities Personal Foresights : A case study in Turin metropolitan area. In *Proceedings of My Ideal City. Scenarios for the European City of the 3rd Millennium* (pp. 46–63). Venice, Italy.

Caneparo, L., Guerra, F., & Masala, E. (2006). UrbanLab - Generative platform for urban and regional design. In *Proceedings of the 8th International DDSS Conference* (pp. 235–253). Eindhoven, The Netherlands.

Carneiro, C., Morello, E., Desthieux, G., & Golay, F. (2010). Urban environment quality indicators : application to solar radiation and morphological analysis on built area. In *Proceedings of the 3rd WSEAS international conference on Visualization, imaging and simulation* (pp. 141–148). Ste-

vens Point, Wisconsin, USA : World Scientific and Engineering Academy and Society (WSEAS).

Clarke, K. C., & Gaydos, L. J. (1998). 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*, *12*(7), 699–714. doi: 10.1080/136588198241617

Clarke, K. C., Hoppen, S., & Gaydos, L. (1997). A self-modifying cellular automaton model of historical urbanization in the San Francisco Bay area. *Environment and Planning B : Planning and Design*, *24*(2), 247–261. doi: 10.1068/b240247

Crooks, A., Hudson-Smith, A., & Patel, A. (2010). *Building 3D Agent-Based Models for Urban Systems* (CASA Working paper N° 161).

Curie, F., Perret, J., & Ruas, A. (2010). Simulation of urban blocks densification. In *Proceedings of 13th AGILE International Conference on Geographic Information Science* (pp. 108–123). Toulouse, France.

CUS. (2011). *Plan d'occupation des sols - règlement (communautï¿½ urbaine de strasbourg)* (Rapport technique). CommunautÏ¿½ Urbaine de Strasbourg.

de Viguerie, P. (2006). *Les politiques de l'urbanisme et de l'habitat face au changement climatique* (Rapport technique). Conseil économique et social.

Devisch, O., Timmermans, H. J. P., Arentze, T. A., & Borgers, A. W. J. (2006). Modelling Residential Search and Location Choice - Framework and Numerical Experiments. In *Proceedings of 8th International DDSS Conference* (pp. 185–200). Eindhoven, NL.

Dibble, C., & Feldman, P. (2004). The GeoGraph 3D Computational Laboratory : Network and Terrain Landscapes for RePast. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, *7*(1).

Dubos-Paillard, E., Guermond, Y., & Langlois, P. (2003). Analyse de l'évolution urbaine par automate cellulaire : le modèle SPACELLE. *L'Espace géographique*, *32*, 357–378.

El-Hakim, S. F. (2001). A flexible approach to 3D reconstruction from single images. In *Proceedings of SIGGRAPH '01 Sketches and Applications*. Los Angeles, USA.

El Makchouni, M. (1987). Un système graphique intelligent d'aide à la conception des plans d'occupation des sols : SYGRIPOS. In *Proceedings of 12th Urban Data Management Symposium* (pp. 204–218). Blois, France.

Faucher, D. (2001). *UrbanLab modélisation déclarative des enveloppes urbaines réglementaires* (Thèse de doctorat). Université de Nantes.

Fisher-Gewirtzman, D., Shach Pinsly, D., Wagner, I. A., & Burt, M. (2005). View-oriented three-dimensional visual analysis models for the urban environment. *Urban Design International*, *10*(1), 23–37. doi: 10.1057/palgrave.udi.9000133

Franklin, W. R. (2000). Applications of Analytical Cartography. *Cartography and Geographic Information Systems*, *27*(3), 225–237.

Grabler, F., Agrawala, M., Sumner, R. W., & Pauly, M. (2008). Automatic generation of tourist maps. In *Proceedings of SIGGRAPH '08 : ACM SIGGRAPH 2008* (pp. 1–11). New York, NY, USA. doi: 10.1145/1399504.1360699

Gröger, G., & Plümer, L. (2012). CityGML - Interoperable semantic 3D city models. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, *71*, 12–33. doi: 10.1016/j.isprsjprs.2012.04.004

Haala, N., & Kada, M. (2010). An update on automatic 3D building reconstruction. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, *65* (6), 570 - 580.

Hammam, Y., Moore, A., Whigham, P. A., & Freeman, C. (2003). A Vector-Agent Paradigm for Dynamic Urban Modelling. In *Proceedings of 15th Annual Colloquium of the Spatial Information Research Centre Dunedin New Zealand* (pp. 99–104).

Hervy, B., Billen, R., Laroche, F., Carré, C., Servières, M., & al. (2012). A generalized approach for historical mock-up acquisition and data modelling : Towards historically enriched 3d city models. In T. Leduc, G. Moreau, & R. Billen (Eds.), *Usage, Usability, and Utility of 3D City Models - European COST Action TU0801,* art. 02009 (p. 1-10). EDP Sciences.

IAURIF. (2005a). Appréhender la densité : 2. Les indicateurs de densité. *Note Rapide sur l'occupation du sol*, *383*.

IAURIF. (2005b). Appréhender la densité : 3. Formes urbaines et densités. *Note Rapide sur l'occupation du sol*, *384*.

Isaacs, J. P., Gilmour, D. J., Blackwood, D. J., & Falconer, R. E. (2011). Immersive and non immersive 3D virtual city : decision support tool for urban sustainability. *Journal of Information Technology in Construction*, *16*, 151–161.

Jantz, C. A., Goetz, S. J., Donato, D., & Claggett, P. (2010). Designing and implementing a regional urban modeling system using the SLEUTH cellular urban model. *Computers, Environment and Urban Systems*, *34* (1), 1–16.

Kampf, J. H., Montavon, M., Bunyesc, J., Bolliger, R., & Robinson, D. (2010). Optimisation of buildings' solar irradiation availability. *Solar Energy*, *84* (4), 596–603. doi: 10.1016/j.solener.2009.07.013

Lammeren, R. J. A., Momot, A., Olde Loohuis, R. J. W., & Hoogerwerf, T. C. (2005). 3D visualizations and 2D scenarios. In *Trends in real-time landscape visualization and participation.*

Mï¿½ller, P., Wonka, P., Haegler, S., Ulmer, A., & Van Gool, L. (2006). Procedural modeling of buildings. *ACM Transactions on Graphics*, *25* (3), 614–623. doi: 10.1145/1141911.1141931

Plazanet, C. (2008). Morphogenèse de la Métropole. In *Projet de recherche interdisciplinaire EPFL. Rapport de recherche.*

Puissant, A., Lachiche, N., Braud, A., Skupinski, G., & Perret, J. (2010). Classification des tissus urbains à partir de données vectorielles - application à Strasbourg. In *Actes de la confi¿½rence SAGEO 2010* (pp. 198–211). Toulouse, France.

Ramos, F. (2003). *Modélisation et Validation d'un Système d'Information Géographique 3D opérationnel* (Thèse de doctorat non publiée). Université Paris-Est.

Raveaux, R., Burie, J.-C., & Ogier, J.-M. (2008). Object extraction from colour cadastral maps. In *Proceedings of the Eighth IAPR International Workshop on Document Analysis Systems* (Vol. 0, pp. 506—514). Nara, Japan.

Ruas, A., Perret, J., Curie, F., Mas, A., & al. (2011). Conception of a GIS-Platform to simulate urban densification based on the analysis of topographic data. In *Advances in Cartography and GIScience. Volume 1* (pp. 413–430). Springer Berlin Heidelberg. doi: 10.1007/978-3-642-19214-2_28

Schelling, T. C. (1971). Dynamic models of segregation. *Journal of Mathematical Sociology*, *1*, 143–186.

Shen, Z., & Kawakami, M. (2010). An online visualization tool for Internet-based local townscape design. *Computers, Environment and Urban Systems*, *34*(2), 104–116. doi: 10.1016/j.compenvurbsys.2009.09.002

Silva, V. (2010). *Conception et évaluation d'un prototype de simulation de la morphogenèse urbaine par agents vecteurs multi-échelles* (Thèse de doctorat non publiée). Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne.

Stefani, C. (2010). *Maquettes numériques spatio-temporelles d'édifices patrimoniaux : modélisation de la dimension temporelle et multi-restitutions d'édifices* (Thèse de doctorat non publiée). Arts et Mï¿½tiers ParisTech.

Weber, B., Mï¿½ller, P., Wonka, P., & Gross, M. (2009). Interactive Geometric Simulation of 4D Cities. *Computer Graphics Forum*, *28*, 481–492.

White, R. (2000). High-resolution integrated modelling of the spatial dynamics of urban and regional systems. *Computers Environment and Urban Systems*, *24*(5), 383–400.

White, R., & Engelen, G. (1993). Cellular automata and fractal urban form : a cellular modelling approach to the evolution of urban land-use patterns. *Environment and Planning A*, *25*(8), 1175–1199. doi: 10.1068/a251175