

Stage de recherche

# COÉVOLUTION DU RÉSEAU VIAIRE ET DU BÂTI

*Auteur :*

Merwan ACHIBET

*Encadrants :*

Stefan BALEV

Antoine DUTOT

Damien OLIVIER

ILLUSTRATION



Mars - Juin 2012

## KEYWORDS

Urban system, city morphogenesis, Voronoi diagram, cellular automaton.

## EXTENDED ABSTRACT

Gathering issues of human, economic, geographic and political nature, the city truly is a complex system. The increasing growth in population and technology produces urban systems like the world has never seen before, of increasing size, increasing heterogeneity and increasing complexity. Studying the relationships between its internal elements is primordial to the understanding of its mechanics and to better predict their developement. This work focuses on the relationship between the pattern of human installations within the city – characterized at the atomic level by a basic subdivision, the land lot – and its road network.

Systematic definitions of the city are many. Through the anthropologist's eye it can be seen as a concentration of persons, the economist will prefer to view it as a support for the exchange of financial and physical assets and the urbanist as a functional entity composed of flows and services. We choose to consider that the evolution of a city is driven by its population, translated as a measure of its density. This goes in hand with our focus as land lots are inhabited by the same people using the surrounding roads to go from one place to another and urbanistic decisions are motivated by a need to optimize the city, streamlining transport means and avoiding high contrasts in the urban fabric.

Study of the domain of urban simulations shows that available scientific works can be classified in two different categories. For visual rendering purposes, special effects in movies or video games, methods have been proposed that generate a visually satisfying system without ??? realism. These are often based on empirical observations and the main idea is to emulate the street patterns found in any urban system. Scientific ??? modeling, on the other hand, prefers to focus on the inner qualities of a city, often by studying a subset of those, to analyze its current state and extrapolate its future. We orient our research with the latter in mind but the former represents a non-negligible source of inspiration.

A reader browsing through the field litterature will often encounter cellular automata. This structure, which applicability and potential complexity has been proven over times, is fit for describing any kind of space-related

problem. Nevertheless, its rigorous formalism may sometimes restrain realism and impact the validity of the model. For example, a cellular automaton topology is, by definition, perfectly regular and representing a city with a set of identical and aligned cells seems like a coarse simplification. In the same way, the fact that each cell has an identical neighborhood structure, the temporal synchronism and the state discretization may be questioned. We take a drastic step towards realism and embrace the spatial aspect of the city by replacing the classic cellular automaton with a Voronoï diagram following the same basic concepts. Each of its cell represents a land lot and neighborhood relationships that are ruled by adjacency determine its future state; the regularity constraint is thus relaxed. Voronoi edges delineate the Voronoi space of land lots and, as such, are perfect support for roads. +++

The different elements represented in our model (*i. e. lots and roads*) are declined in two flavors???. *Potential* elements have a fuzzy??? status; their spatial characteristics are known but until they are definitely built, they have no effect on the overall city and only represent an idea, a possible outcome. *Built* elements were potential elements that have been constructed. They form the physical city. Concisely, the gist of the model is to add potential elements to the city and, only later, chose which ones will be built and which ones will be forgotten. The road network expand to accomodate++++. This works has been divided into four separate mechanisms for clarity purposes.

The cellular part of the model lets the inner variables of the city vary based on the Voronoi tessellation. Here, only population density is considered and a set of simple rules reproduces a gradient from centers to exterior?. The vertical growth assured by this mechanism +++

The placement of new potential lots is handled by a general??? based on vector fields. Each data we want to consider is represented as a vector field that will guide the seed for a new lot. For example, a field escaping from high density areas is used to ensure urban sprawl. Another points to the closest road such that new lots extending the city remain??? to its main axes. Then all vector fields are summed up with varying coefficient. This general approach can model any kind of guidance or constraint; it is possible to use a field repelling the seed from any obstacle (unbuildable areas, water).

Which lots should I build?

The road network expansion is fully based on the placement of lots, potential or built, as their supports are the Voronoi cells.

NETWORK SIMPLEX

RESULTATS/MESURES

MINI CONC

# Table des matières

<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>5</b>
<b>2</b>	<b>État de l’art</b>	<b>5</b>
2.1	Automates cellulaires et simulation urbaine . . . . .	5
2.2	Approches alternatives . . . . .	10
<b>3</b>	<b>Le modèle</b>	<b>12</b>
3.1	Structure . . . . .	12
3.2	Potentialité . . . . .	14
3.3	Mécanismes . . . . .	16
3.3.1	Automate cellulaire graphe . . . . .	16
3.3.2	Placement des parcelles potentielles . . . . .	19
3.3.3	Construction des parcelles . . . . .	21
3.3.4	Expansion du réseau routier . . . . .	21
<b>4</b>	<b>Construction</b>	<b>22</b>
4.1	Le graphe parcellaire . . . . .	22
4.2	Le graphe viaire . . . . .	23
<b>5</b>	<b>Mesures</b>	<b>26</b>
<b>6</b>	<b>Conclusion</b>	<b>26</b>

## REMERCIEMENTS

# 1 Introduction

Avec ses enjeux économiques, humains, ???, ???, la ville est véritablement un système complexe. La croissance des systèmes urbains atteint aujourd’hui un stade imprécédé???. La taille et la complexité des villes augmentent STATS. Il est nécessaire d’étudier ces changements pour comprendre les mécanismes sous-jacents à ce type de système et pour prévoir leur évolution future. On se concentre ici sur l’évolution jointe de deux ensembles majeurs du tissu urbain : le bâti et le viaire.

## DETAILS

Ces deux aspects de la ville semblent aller de paire puisque le bâti abrite la population tandis que le viaire leur permet de se déplacer. Il est ainsi naturel d’utiliser la densité de population comme force de guidage à l’évolution de la ville.

## DETAILS

La première partie présente un état de l’art de la modélisation de systèmes urbains et se concentre particulièrement sur les méthodes à base d’automates cellulaires tout en adoptant un point de vue historique pour justifier l’adoption de cette structure. Le modèle conçu dans le cadre de ce stage de recherche est ensuite présenté en seconde partie. La troisième section aborde des problématiques pratiques rencontrées lors de l’implémentation dudit modèle. Enfin, des mesures diverses sont employées pour tester et valider ce travail dans la quatrième partie.

# 2 État de l’art

## 2.1 Automates cellulaires et simulation urbaine

La modélisation de systèmes complexes est longtemps uniquement passée par l’usage de méthodes mathématiques ; typiquement, des systèmes d’équations différentielles. Ces techniques permettent de décrire des lois d’évolution et d’observer, ainsi que de prédire par extrapolation, le comportement de phénomènes du réel. Dans le cas de modèles prenant en compte un vaste jeu de paramètres, cette approche peut néanmoins se révéler délicate à employer. Plus intrinsèquement, même si une telle modélisation est basée sur des observations ancrées dans la réalité, il s’agit d’une représentation conceptuelle d’un problème et aucune mimique des mécaniques sous-jacentes ne s’opère.

Historiquement, les prémices de l'informatique moderne et d'un tout autre paradigme de modélisation sont à attribuer aux esprits du milieu du vingtième siècle. Alan Turing introduit en 1936 la machine éponyme qui, bien que purement théorique, possède un module de contrôle ainsi qu'une mémoire et peut donc exécuter une infinité d'algorithmes. Cette démarche se démarque de l'approche mathématique et semble plus humaine ; on ne résout pas un problème en utilisant des fonctions associant une quantité à un résultat mais on agit véritablement sur ses données. L'idée de base de Turing était d'ailleurs d'assimiler le fonctionnement de sa machine au travail d'une personne remplissant les cases d'un tableau infini.

TRANSITION. Entraîné par cette mouvance procédurale et en réaction aux réseaux de neurones de McCulloch et Pitts, John von Neumann et Stanislaw Ulam joignent leurs travaux pour concevoir l'automate cellulaire en 19?? CITATION WOLFRAM : un système comprenant un ensemble d'automates à états spatialement localisés (typiquement sous forme de grille) et interconnectés en fonction de leur proximité. Les entrées de chaque automate correspondent alors aux états des automates voisins et de cette organisation se dégagent de fortes relations d'interdépendance. Le jeu de la vie de Conway en est un exemple classique. La simplicité de ses règles, mise en contraste avec la variété des configurations engendrées, témoigne de la richesse des automates cellulaires [1].

Les automates cellulaires ont depuis été extensivement étudiés et sont appliqués à l'étude de nombreux phénomènes biologiques, physiques et sociaux [2]. La motivation d'Ulam lors de leur conception était d'ailleurs de modéliser la croissance de cristaux. On peut aussi citer en exemple la simulation de la dynamique de fluides [3] et de la croissance de tumeurs [4]. Leur caractère spatial laisse supposer qu'ils sont particulièrement adaptés aux applications géographiques, et dans le cadre de notre problématique, urbaines. Ils ne furent paradoxalement pas immédiatement exploités à cet effet et c'est seulement suite à un article de Waldo Tobler, en 1975, que le rapprochement entre les automates cellulaires et le domaine de la géographie apparaît clairement [5]. Sont ensuite publiés des travaux majeurs appliquant l'automate cellulaire à eds problématiques géographiques multi-échelle telles que l'évolution d'épidémies [6] et la ségrégation de population [7].

Une idée très exploitée dans ce domaine est d'associer un potentiel de transition à chaque cellule et ce, vers tous les états qu'elles peuvent prendre. Dans les modèles déterministes, la transition vers l'état à plus haut potentiel est appliquée tandis que dans les modèles stochastiques, un tirage aléatoire



FIGURE 1 – Configuration produite par le modèle de Schelling. Chacune des deux couleurs représente une population différente.

biaisé est préféré. Le potentiel d’une cellule à passer à un nouvel état est déterminé en fonction de paramètres propres au modèle. Peuvent être pris en compte l’élévation du terrain, la densité de population, la proximité d’axes routiers, la proximité de centres urbains, l’âge des parcelles, leur valeur ; en fait, toute combinaison d’attributs relatifs à un réseau urbain. Par exemple, dans une simulation représentant les différents types d’usage, le passage d’une cellule à l’état *résidentiel* pourrait dépendre de la proximité des commerces et des routes et de l’éloignement des zones industrielles. Bien sûr, un nombre élevé de paramètres à prendre en compte requiert un couplage fin et l’impact de chaque variable peut être pondéré. Puisque les variations individuelles de paramètres n’émergent pas de manière transparente à la surface de la simulation, les modèles urbains basés sur des automates cellulaires doivent être finement calibrés et leur réalisme est un défi en soi. Pour contourner ce problème, Yeh et Li prônent l’usage d’un réseau de neurones pour pondérer chaque paramètre à partir de l’analyse de données cartographiques historiques [8].

Il est important de noter que la simplicité du formalisme enveloppant un



automate cellulaire strict s’oppose à la qualité de la simulation, notamment dans le cadre de modèles spécifiques [9]. Dans ce cas, une prise de liberté quant aux formalisme originel est autorisée, voire nécessaire, pour obtenir des résultats satisfaisants [10].

La première limite que le formalisme cellulaire de base impose est la discrétisation des états que chaque cellule peut adopter. Même si cette caractéristique fait partie intégrante des particularités qui confèrent aux automates cellulaires leur simplicité d’usage et d’analyse, la description de quantités pouvant arborer un éventail infini de valeurs est alors impossible. Plus concrètement, il est aisé de catégoriser les cellules d’un espace selon le fait, par exemple, qu’elles contiennent des installations humaines ou non (état booléen) [11, 12] ou de façon plus sophistiquée, en fonction de leur type d’usage (*résidentiel*, *commercial* et *industriel* [13] et plus [14]). Représenter des quantités réelles et des variations continues est moins aisé. Pour symboliser plus finement la densité au cœur d’un ensemble urbain, Semboloni utilise par exemple un automate cellulaire de dimension trois dans lequel plus une pile de cellules actives est haute et plus la zone représentée est peuplée [15]. Plus généralement, on peut s’autoriser à représenter l’état d’une cellule par un vecteur contenant des valeurs réelles ; des règles de transitions adaptées et mesurées sont alors à mettre en place.

L’homogénéité d’un automate cellulaire fait partie intégrante de sa définition originelle : en mettant de côté l’état qu’elles adoptent, toutes les cellules sont identiques en forme et en structure de voisinage. Dans le cadre de notre problématique, cette approche est limitante car, dans une ville, les parcelles ne sont que rarement identiques et alignées. Similairement, la notion de voisinage est clairement à redéfinir. Pour des problèmes classiques, les voisinages de von Neumann et de Moore sont régulièrement utilisés mais la relation par contiguité qu’ils décrivent ne convient pas à la représentation des liens de dépendance à plus grande échelle se développant dans un système urbain. Le positionnement d’un bâtiment résidentiel dans une ville se base évidemment sur le voisinage direct des zones envisagées (on veut ajouter une maison dans un quartier résidentiel) mais il faut aussi prendre en compte les alentours plus distants (la centrale thermique se trouvant à 500 mètres du site peut poser problème). Une solution possible est d’étendre les voisinages de von Neumann et de Moore tout en conservant leur forme caractéristique CITATION. O’Sullivan a choisi de relaxer cette contrainte de partitionnement spatial régulier pour faire un pas dans la direction du réalisme [16, 17] : conventionnellement, une cellule d’automate correspond à un sous-espace ur-

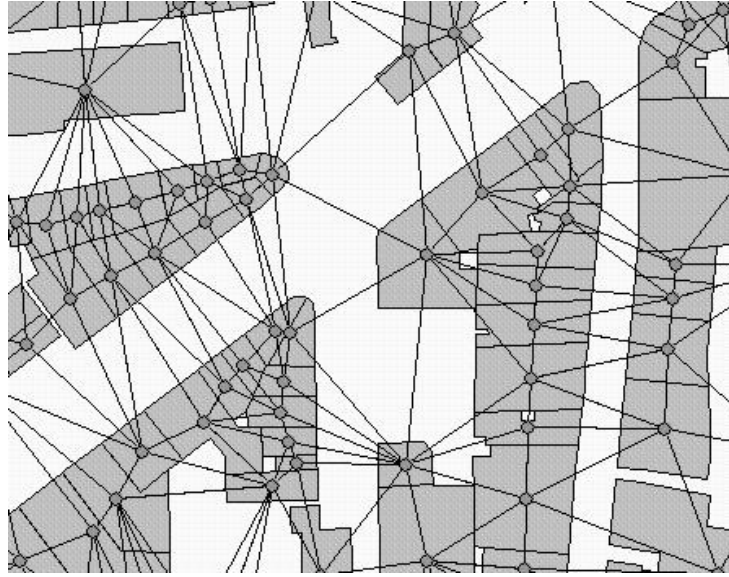
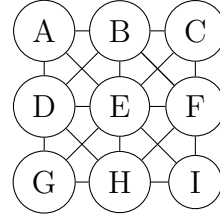


FIGURE 2 – Hoxton, un quartier de Londres, modélisé par l’automate cellulaire graphe de David O’Sullivan [16].

A	B	C
D	E	F
G	H	I

(a) Automate cellulaire classique.



(b) Automate cellulaire graphe.

bain ou bien une parcelle cadastrale mais dans chacun de ces cas le modèle se base évidemment sur une simplification grossière de l’espace étudié. Il décide donc de donner à chaque cellule les mêmes qualités topologiques que les parcelles qu’elles représentent, même formes, même dimensions, même coordonnées (mais peut-on encore parler de cellules ?). Une variété de relations de voisinage sont alors envisageables, par voisinage au sens propre, par distance dans un rayon d’influence, par visibilité. L’éloignement du formalisme cellulaire est drastique car la structure perd de son homogénéité (chaque cellule est différente), la couverture de l’espace n’est plus complète (des vides entre les cellules apparaissent) et le voisinage diffère lui aussi. Mais TOPOLOGIE REELLE.

Une prise de liberté quant à l’aspect temporel est aussi envisageable. Un automate cellulaire strict est synchrone, i.e. les changements d’état de toutes les cellules s’effectuent simultanément. Si le choix était fait de mettre à jour chaque état de façon asynchrone, le comportement de l’automate en serait lourdement modifié. Par exemple, les qualités auto-réplicatives de certaines entités du jeu de la vie ne seraient pas garanties. Il est pourtant légitime de se questionner sur la validité d’un tel choix dans une simulation urbaine, premièrement parce qu’une ville est un système complexe et désordonné, deuxièmement parce les processus qui s’y déroulent sont réglés sur différentes échelles temporelles.

Bien que les automates cellulaires soient couramment utilisés pour simuler le trafic routier (dans leur version 1D CITATION ou 2D [18]), ils s’accordent peu avec la construction même d’un réseau viaire. Dans les simulations cellulaires urbaines, le positionnement des routes a un impact sur le développement des cellules puisque le viaire attire le bâti mais le réseau est souvent fourni en entrée et reste fixe. Nous sommes amenés à nous interroger sur la capacité des automates cellulaires à modéliser le développement routier. Les relations de proximité les caractérisant sont-elles adaptées à la construction de structures dont l’échelle est celle de la ville et non plus celle de la parcelle ? Est-il bénéfique de représenter une route par un ensemble de cellules ou plutôt par une entité unique ? PRECISER

## 2.2 Approches alternatives

Les automates cellulaires ne sont pas l’unique moyen de modéliser la croissance urbaine. Plusieurs simulations existantes sont des systèmes multi-agent [19, 20]. Dans ces cas, un agent est assimilé à un promoteur immobilier et peut acheter des terres, les vendre, les développer ou changer leur type. Les actions qu’il entreprend sont évaluées en fonction de l’impact sur la ville (changement de la valeur immobilière, avis de la population) et des réglementations locales afin d’éviter toute configuration illégale. Pour la construction du réseau routier, une solution est de mettre en place, en plus des agents promoteurs, deux types d’agents traceurs. Les *extenders* parcourent toute la surface du terrain à la recherche de bâtiments isolés puis tracent une route jusqu’au réseau urbain. Les *connectors* se déplacent uniquement sur le réseau viaire et y raccordent les bâtiments non connectés se trouvant dans leur rayon de détection [19]. PAS LE BON ORDRE

D’autres solutions s’éloignent des systèmes complexes et penchent du côté

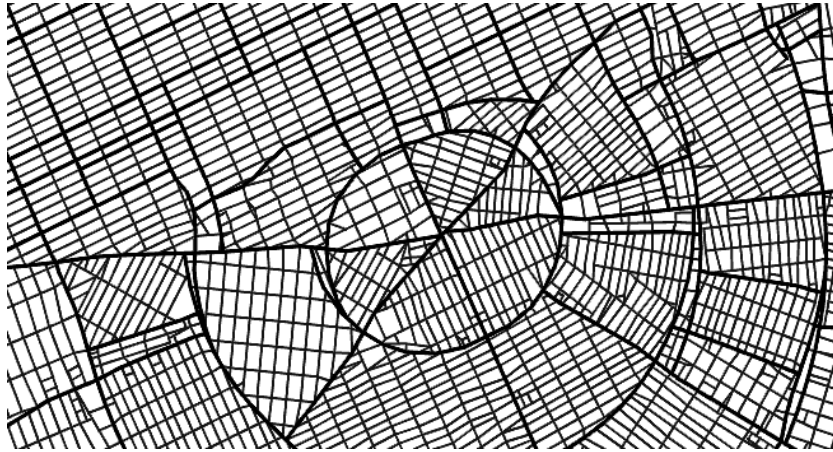


FIGURE 3 – CityEngine [22].

de la génération procédurale de contenu existent. Souvent, le domaine d'application de telles méthodes est l'infographie, le cinéma et le jeu vidéo et l'objectif est alors de construire de manière automatique une ville visuellement réaliste sans se soucier de son caractère fonctionnel. Usuellement, l'organisation parcellaire dépend entièrement du réseau routier car la première étape est souvent de générer un réseau viaire complet puis de placer le bâti en subdivisant récursivement les niches vides formées par les voies. Dans Citygen [21], un point  $p$  de l'espace est aléatoirement choisi puis on calcule un ensemble de plusieurs routes raccordant  $p$  au réseau routier existant en faisant varier leur déviation angulaire et un paramètre de bruit ; la route finale est celle pour laquelle la variation d'altitude est la plus faible. ECHAN-TILLONAGE CityEngine [22] utilise un L-System dont les règles permettent de reproduire les différents motifs quadrillés, radiaux et organiques que l'on retrouve dans une ville. La nature récursive des L-Systems permet à ces motifs de se combiner et d'apparaître à différents niveaux de profondeur ; les résultats sont saisissants (voir figure 3). Dans une autre simulation, le tracé des routes suit les *hyperstreamlines* [23] formées par un champ de vecteurs. Ce champ est calculé par combinaison de plusieurs autres champs de vecteurs, chacun représentant des contraintes directionnelles particulières telles que les zones interdites (eau, espaces verts), l'altitude et la densité de population. Ces techniques sont intrinsèquement géométriques, et comme précisé plus haut, le résultat est purement visuel, mais elles représentent une source d'inspiration à ne pas négliger.

Souvent, SPECIALISATION. L'un des seuls modèles gérant à la fois l'évolution du réseau viaire et du bâti est présenté par Weber [24] et n'emploie pas d'automate cellulaire. Le principe est le suivant : à chaque agrandissement du réseau urbain, on crée plusieurs routes virtuelles en suivant des règles géométriques précises (allongement des voies existantes, limitation du degré des carrefours à 4, l'angle entre chaque rue tend vers 90 degrés). Parmi les  $n$  routes générées, une seule sera construite. Pour la choisir, le trafic sur ces nouvelles routes est simulé par des agents piétons et véhicules et l'on identifie celle qui sera la plus bénéfique au réseau.

## 3 Le modèle

### 3.1 Structure

Les automates cellulaires sont des structures versatiles et puissantes dont le formalisme originel impose néanmoins quelques limitations ; l'une des principales étant, à nos yeux, un maillage régulier et statique. Pour répondre à notre problématique, il est nécessaire d'employer une structure respectant les critères suivants :

- Elle doit partitionner l'espace, possiblement de façon irrégulière ;
- Des relations de voisinages pourront être déduites de sa topologie ;
- Elle doit pouvoir représenter à la fois la parcellisation du territoire et le réseau routier.

Le diagramme de Voronoï est un candidat idéal. Sa constitution est intrinsèquement spatiale puisqu'il s'agit d'un partitionnement axé autour de points spéciaux, les générateurs, chacun possédant une cellule contenant tous les points plus proches de ce générateur que de tout autre. Autrement dit, la distance séparant un point  $p$  placé dans une cellule de Voronoï et le générateur de cette même cellule est inférieure à la distance séparant  $p$  de tous les autres générateurs [25]. La figure 4 fournit un exemple de diagramme de Voronoï et on remarque que, naturellement, deux générateurs voisins sont équidistants de l'arête les séparant et le segment les reliant y est perpendiculaire.

Les diagrammes de Voronoï trouvent de nombreuses applications en science. En robotique, les obstacles présents dans un environnement peuvent être assimilés à des générateurs et un robot cherchant à maximiser leur évitement préférera longer les frontières des cellules (les arêtes de Voronoï) [26]. En sociologie géographique, ils permettent d'opposer les zones d'influence de

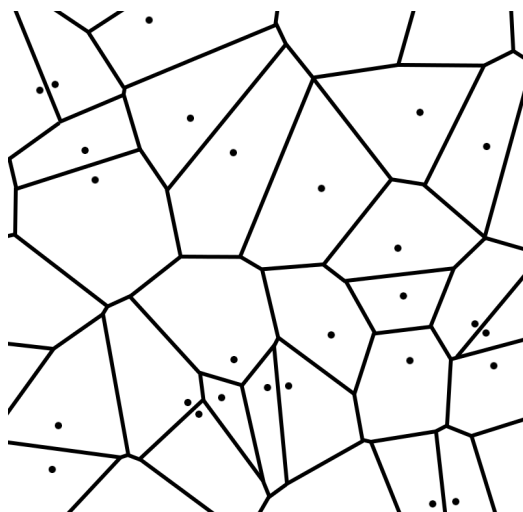


FIGURE 4 – Un diagramme de Voronoï. Chaque point noir est un générateur.

différents éléments urbains et répondent à des questions telles que : quel magasin un piéton sera-t-il plus susceptible de visiter selon la zone dans laquelle il se trouve ? Leur utilisation pour l'étude de l'épidémie de choléra londonienne en 1854 a permis de vérifier le lien entre fontaines publiques infectées (les générateurs) et zones souffrant d'un fort taux de mortalité (les cellules) [27].

Comme leur homonymie le laisse supposer, la cellule de Voronoï remplace la cellule carrée de l'automate cellulaire. On remarque qu'une grille régulière, comme celles présentes dans les automates cellulaires classiques correspond à un diagramme de Voronoï dans laquelle les générateurs sont alignés et régulièrement disposés. Une tessellation de Voronoï peut être considérée comme une généralisation de la structure grillagée ; notre première contrainte est satisfaite.

À l'échelle de ce modèle, chaque cellule représente une parcelle cadastrale et on utilise comme générateur le centre de son empreinte. Le diagramme permet d'identifier les parcelles voisines comme étant celles partageant une arête de Voronoï. Un graphe de voisinage est ainsi construit, et adopte la forme duale du diagramme de Voronoï : la triangulation de Delaunay. Ce premier graphe décrit le réseau de voisinage mettant en relation les parcelles en contact à partir du diagramme et satisfait donc la seconde contrainte.

Cette structure permet de décrire un canevas urbain de base dans lequel l'espace d'influence de chaque parcelle est décrit mais la composante routière reste encore absente du modèle. Chaque arête de Voronoï indique un espace entre deux parcelles et est donc susceptible d'accueillir une route. Dans une véritable ville, chaque parcelle n'est pas encerclée de voies et l'un des objectifs de la simulation est de déterminer quelles arêtes accueilleront des routes. Le diagramme de Voronoï suffit bien à représenter à la fois les éléments du viaire et du bâti et notre dernière contrainte est comblée.

En réalité, dans ce modèle la ville est représentée par deux graphes et le diagramme de Voronoï est uniquement employé en tant que point de départ. Le premier, le graphe du bâti, a pour nœud les centres des parcelles alors que ses arêtes symbolisent les relations de voisinage. Le second, le graphe viaire, a des arêtes représentant les routes et des nœuds carrefour joignant plusieurs voies. Les structures des graphe viaire et bâti sont donc entièrement fondées sur le diagramme de Voronoï puisqu'il s'agit, respectivement, de l'ensemble des arêtes et sommets de Voronoï et de sa triangulation de Delaunay.

REFORMULER

Il est essentiel de dissocier le polygone convexe qu'est la cellule de Voronoï associée à une parcelle et la véritable empreinte cadastrale de cette dernière. Une cellule représente l'influence d'une parcelle dans l'espace urbain et possède comme seul point commun avec l'empreinte son centre puisqu'il s'agit du générateur de la cellule. Similairement, une arête peut indiquer qu'une voie passe entre deux parcelles sans pour autant fournir ses coordonnées ou sa courbure. Si l'on souhaite, dans un but infographique, générer une image de notre ville à partir de ce modèle, un travail d'interprétation est nécessaire et n'a pas été traité à l'occasion de ce projet. Un exemple est visible sur la figure 5.

## 3.2 Potentialité

Via le terme *potentialité*, on souhaite exprimer l'opposition entre deux types d'éléments : les *potentiels* et les *construits*.

Un élément *construit* est une parcelle ou une voie dont l'existence physique est avérée. Il existe *en dur* et affecte ses alentours. L'ensemble des éléments construits forme la ville (voir figure 6).

Un élément *potentiel* peut être assimilé à une idée germant dans l'esprit de l'urbaniste ; à une possibilité envisagée. Un élément potentiel est par la suite soit construit, soit ignoré et oublié. Il sert de prévision à court-terme

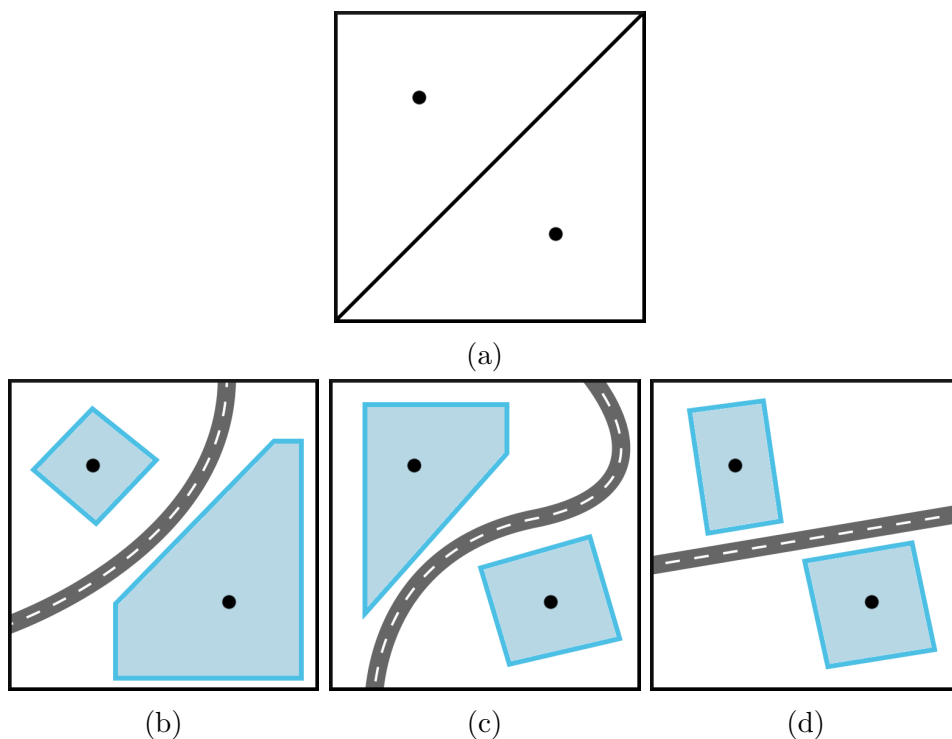


FIGURE 5 – Un diagramme de Voronoï trivial et trois interprétations possibles.

IMAGE

FIGURE 6 – Les éléments construits forment la ville.

quant à l'avenir de la ville et guide sa morphogénèse. La figure 7 reprend la micro-ville de la figure 6 et laisse apparaître voies et parcelles potentielles.

Un élément potentiel, n'étant pas actif au sein de la ville et appartenant uniquement au domaine du prévisionnel, n'a pas d'influence sur les éléments construits. Par contre, la construction de nouveaux éléments peut en dépendre *e.g.* une route peut être construite en conséquence à cette prévision, comme attirée par cette potentielle future installation. Cette dualité dont les relations d'influence sont clairement unidirectionnelles est inspirée du

IMAGE

FIGURE 7 – Les éléments potentiels guident la croissance de la ville.



cycle réel d'urbanisation que l'on pourrait grossièrement décomposer en ces quelques étapes :

1. Un urbaniste prévoit une nouvelle installation en bordure de ville
2. Cette prévision attire la route
3. La nouvelle route et l'installation potentielle attirent d'autres installations potentielles

#### REFORMULER PLUS CLAIREMENT

L'essence du modèle est de placer des éléments potentiels en fonctions de qualités internes au système puis de choisir lesquels véritablement construire. Ce travail a été décomposé en quatre mécanismes distincts.

### 3.3 Mécanismes

#### 3.3.1 Automate cellulaire graphe

La dynamique de croissance urbaine est décomposable sur deux axes. La croissance horizontale décrit l'expansion spatiale de la ville dont l'enveloppe grandit pour occuper plus de territoire tandis que la croissance verticale correspond à l'augmentation des densités au sein de la ville, souvent à partir d'un ou de plusieurs centres. Le mécanisme cellulaire présenté ci-après émule la croissance verticale et les variations de densité internes au système.

On voit la ville est un groupement d'installations humaines axé autour d'un ou de plusieurs centres. Puisqu'il s'agit avant tout d'un foyer de population, les choix appliqués par les autorités sont motivés par un besoin de la rendre toujours plus fonctionnelle. Cela se traduit, par exemple, par un réseau routier construit dans une optique d'optimalité quant au déplacement des habitants, même si la réalité est peuplée de contraintes empêchant une organisation parfaite. Au niveau parcellaire, cela se traduit par un désir d'équilibrer les paysages urbains et d'éviter les contrastes forts. La population et plus précisément sa densité sont donc des facteurs majeurs à prendre en compte, si ce ne sont les principaux. La ville évolue, de nouveaux bâtiments apparaissent, d'autres sont rasés, les quartiers changent et le modèle doit être capable de simuler ces changements. C'est bien sûr par un automate cellulaire, quoi que quelque peu relaxé, que cet aspect est géré.

On propose de représenter trois différents types de densité *faible*, *moyenne* et *élevée* bénéficiant d'attractivité variantes de façon à ce que les parcelles faibles côtoient les parcelles moyennes, les parcelles moyennes côtoient les

parcelles élevées et les parcelles faibles s'éloignent des parcelles élevées. Ce processus d'attraction/répulsion évoque le modèle de ségrégation de Schelling à la différence qu'ici trois types de *population* interagissent et qu'il n'y a pas de contrainte de déménagement (si une parcelle *faible* disparaît, elle ne doit pas nécessairement réapparaître ailleurs). Ainsi un dégradé discret de densité apparaît comme dans une ville réelle. La problématique étant d'étudier la coévolution de deux aspects urbains et non seulement l'évolution des densités (qui ne sert que de support à l'essor de la ville), on a préféré choisir une règle basique. Malgré cette simplicité, le modèle est conçu pour que chaque mécanisme puisse être modifié indépendamment des autres et il est tout à fait possible d'utiliser par la suite un automate cellulaire plus sophistiqué pour améliorer le réalisme de la simulation. On commence par appliquer cette règle à un automate cellulaire classique (voir figure 8).

$$\begin{pmatrix} 1 & 0.01 & 0 \\ 0.001 & 1.5 & 0.01 \\ 0 & 0.01 & 1.6 \end{pmatrix}$$

FORMULE

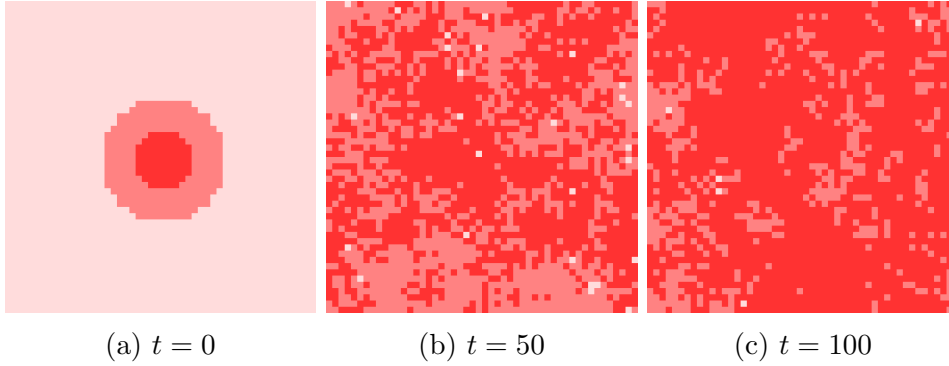


FIGURE 8 – Trois configurations successives de l'automate cellulaire. On y retrouve peu de similarités.

On remarque que chaque itération transforme entièrement l'état de l'automate. Cette situation pourrait être acceptable pour d'autres types d'application mais certainement pas pour une simulation urbaine dans laquelle les changements sont censés s'opérer à l'échelle de la décennie et une relative continuité est attendue *i. e.* un bâtiment est construit pour durer, on ne le remplace pas chaque mois ! Il est donc important d'associer à chaque cellule

un élan favorisant la persistance de son état selon son âge. Les fonctions sigmoïdes, fréquemment employées en modélisation de systèmes complexes, sont idéales pour exprimer cette probabilité de changement en fonction du temps. DETAILS

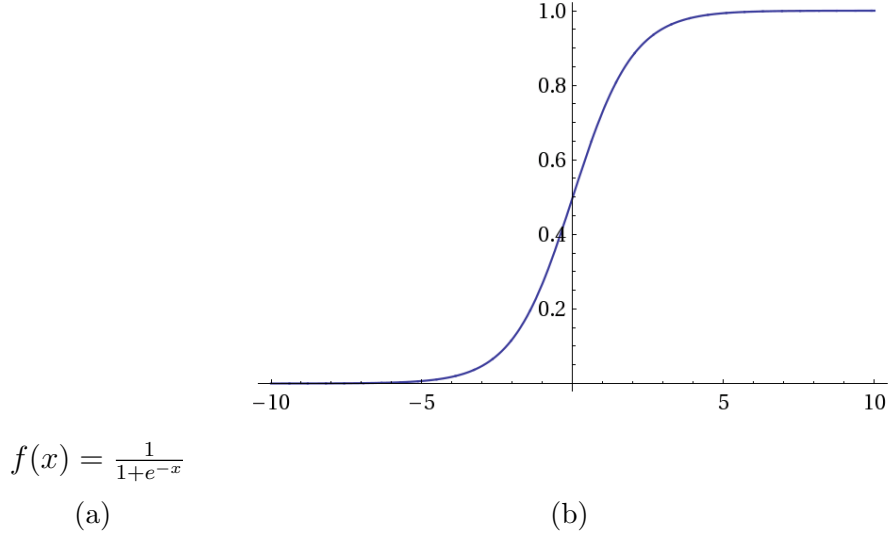


FIGURE 9 – Sigmoïde classique.

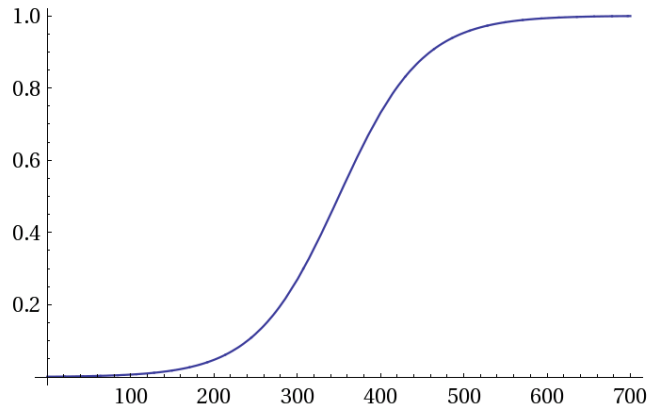
On peut voir sur la figure 11 que le système est plus stable et que ETC  
FAIRE IMAGE : T0 T1 T2 T10 T50 T100

Les exemples précédents permettent d'illustrer les règles de transition et met en évidence le problème de stabilité mais le principe même de cet exposé est de se détacher de la régularité spatiale contraignante des automates cellulaires et c'est à cet effet que l'on a présenté le diagramme de Voronoï. À la manière des automates cellulaires graphes de O'Sullivan [16], chaque parcelle verra son état varier en fonction de son voisinage. Voisine établit non pas par ??? mais par la topologie du diagramme de Voronoï issu des positions des centres des parcelles. Il est à noter qu'à la différence de O'Sullivan, la couverture de l'espace est totale puisque l'on ne représente pas les parcelles exactes mais leur cellule de Voronoï.

Le *graphe du bâti* prend ici la forme duale du diagramme de Voronoï : la triangulation de Delaunay et décrit les relations de voisinage. Un nœud correspond au centre d'une parcelle et une arête lie deux parcelles en tant que voisins.

$$f(t) = \frac{1}{1+e^{-0.02(t-350)}}$$

(a)



(b)

FIGURE 10 – Probabilité de changement d'état en fonction du temps.

IMAGE

Lors de l'exécution de ce mécanisme cellulaire, les parcelles construites influencent tous leur voisins tandis que les parcelles potentielles ??? unidirectionnel (BONNE QUESTION).

TRIPLE IMAGE

### 3.3.2 Placement des parcelles potentielles

Le second mécanisme place de nouvelles parcelles en bordure de la ville et est responsable de sa croissance dans l'espace. Les nouvelles parcelles placées bénéficient néanmoins d'un statut spécial car elles sont considérées comme *potentielles* et se démarquent des parcelles *construites* par leur impact sur l'évolution du système :

- L'état d'une parcelle potentielle dépend de toutes ses voisines
- Une parcelle potentielle n'influence pas l'état des parcelles voisines construites
- Une parcelle potentielle peut accueillir une route

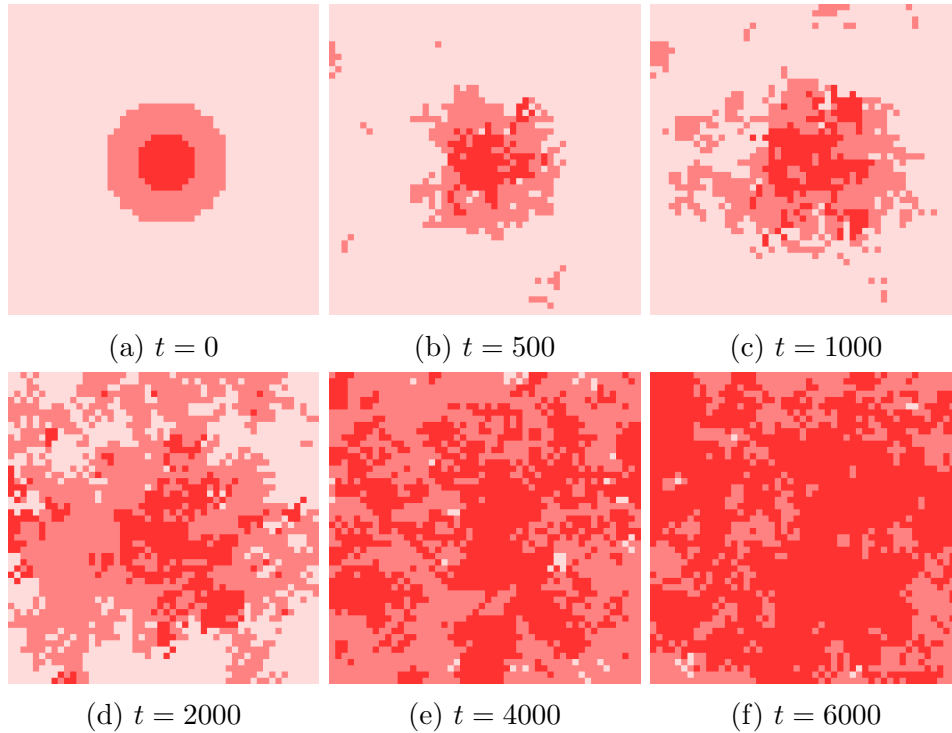


FIGURE 11 – Trois configurations successives de l'automate cellulaire stabilisé.

Cette influence unidirectionnelle dans le mécanisme cellulaire permet à la parcelle potentielle d'être prête et accordée à son environnement proche si elle est construite par la suite sans pour autant que les parcelles déjà construites ne soient influencées par une parcelle n'existant pas.

En quelques mots, le placement se déroule comme suit :

1. On détermine les centres de la ville en fonction de la densité
2. On dépose sur un des centres une *graine* mobile qui servira de générateur à la nouvelle parcelle
3. La graine se déplace sous l'influence des variables inhérentes à la ville
4. Quand la graine stoppe son mouvement, on y crée la parcelle

#### DETECTION DES CENTRES

Le déplacement de la graine est un processus pouvant potentiellement prendre en compte de nombreuses variables. Dans l'application d'exemple

que l'on décrit, seules la densité et le placement des routes peuvent guider la graine, car ce sont les seules données considérées. Cependant, on souhaite que le modèle soit extensible et qu'il soit capable de supporter d'autres variables et contraintes : la valeur des sols par exemple, ou bien la pente des zones envisagées ou l'impossibilité de s'installer sur certains types de terrain (forêts, plans d'eau). De cette idée de graine se déplaçant en fonction d'influences diverses transpire un véritable aspect physique.

Pour rester en accord avec cet aspect physique on emploie un champ de vecteur généré à partir de l'état du système urbain pour guider la graine vers sa destination. Puisque de nombreux paramètres sont à prendre en compte, on utilise un champ de vecteur par paramètre que l'on souhaite exprimer puis on les combine, ce qui permet de pondérer l'impact de chaque donnée.

Par exemple,

DENSITE

PATTERN

COMMENTAIRE

IMAGES : densité / routes / obstacle / altitude

ARRET (AIRE ? SIGMOIDE ?)

### 3.3.3 Construction des parcelles

CHOIX

TAUX DE CROISSANCE

### 3.3.4 Expansion du réseau routier

Le placement des parcelles se base sur le réseau routier puisque pour qu'une parcelle soit construite, elle doit être reliée à au moins une voie. Les voies sont quant à elle dépendantes des parcelles car selon notre définition, une route est une arête de Voronoï d'une parcelle (potentielle ou construite). Ce cycle est similaire à la morphogénèse d'une ville car le processus d'extension que l'on observe dans un cas d'urbanisme réel est le suivant :

1. On prévoit d'installer des bâtiments en bordure de ville (les parcelles potentielles)
2. On construit une route avant de construire les parcelles
3. On construit plus tard les parcelles

DEJA DIT AILLEURS

les routes sont donc supports aux parcelles et leur construction est motivée par la perspective de nouvelles parcelles. Les parcelles potentielles étant placées par un mécanisme explicité plus haut, il reste à sélectionner quelles arêtes du diagramme de Voronoï vont devenir de véritables routes. On retrouve ici aussi le vocabulaire de la potentialité utilisé au niveau parcellaire : les arêtes de Voronoï sont considérées comme routes *potentielles* et

La sélection des routes aptes à être construites doit être justifiée par un besoin fonctionnel assurant une activité interne de la ville efficace. Dans le cas du réseau viaire, on cherche donc à éviter les engorgements et donc à organiser le maillage routier de façon à ce que les zones à forte densité soient correctement desservies. DENSITE

NETWORK SIMPLEX

CONNEXITE

## 4 Construction

Notre système urbain est décrit sur deux niveaux ; plus précisément, par deux graphes. On distingue le graphe parcellaire du graphe viaire car, bien qu'ils soient étroitement liés, ils représentent des couches différentes du réseau urbain.

QQUAD MACHIN NON, 2 GRAPHS OUI

### 4.1 Le graphe parcellaire

Le graphe parcellaire correspond à la couche bâti. Ses nœuds sont les centres des parcelles et chacune de ses arêtes représente une relation de voisinage entre deux parcelles. Un diagramme de Voronoï est nécessaire à la construction de ce graphe. Les seules données dont l'on a besoin en entrée sont donc les positions centrales des parcelles. Ces coordonnées peuvent être extraites de fichiers d'informations géographiques mais dans un premier temps, et dans un but illustratif, on se cantonne à utiliser des positions aléatoirement choisies.

La librairie Java JTS [28] est spécialisée dans les traitements géométriques et permet notamment de générer un diagramme de Voronoï à partir d'une liste de points. Le résultat d'un tel traitement prend la forme d'un ensemble de polygones, chacun représentant une cellule de Voronoï, mais aucune autre



FIGURE 12



FIGURE 13

information, notamment d'adjacence, n'est fournie. Une fois le graphe parcellaire peuplé par des nœuds positionnés aux coordonnées fournies plus tôt, il reste donc à calculer les relations de voisinage et à ajouter les arêtes.

Puisque l'on ne dispose que des polygones formant le diagramme de Voronoï et des positions de leur centroïdes, on procède par l'utilisation de tests géométriques. Naturellement, si deux cellules sont en contact – si elle partagent une arête – alors on relie les deux nœuds du graphe leur étant associés.

La finalité de cet exercice n'est pas seulement de faire évoluer l'automate cellulaire irrégulier que forme cette structure mais aussi de lui permettre de se transformer au cours du temps, de s'étendre par morphogenèse. INSERTION, DELETION

## 4.2 Le graphe viaire

Le graphe viaire correspond à la couche routière. Ses nœuds sont des carrefours, aux croisements des parcelles, et ses arête des voies. En pratique, pour différencier les routes potentielles des routes construites, on attribue





FIGURE 14



FIGURE 15

une étiquette spéciale à ces dernières.

Comme lors de la construction du graphe parcellaire, on commence par placer les nœuds (ici des carrefours) puis on veut les relier par des arêtes (les routes).

Dans un premier temps, il nous faut déterminer les positions des croisements qui feront office de nœuds dans le graphe viaire. Cette phase est basée sur l'analyse du graphe parcellaire construit plus tôt. Puisqu'une route entre deux bâtiments peut être définie par une arête de Voronoï partagée entre deux parcelles, il est logique d'admettre qu'un croisement correspond à un sommet de Voronoï partagée par deux cellules ou plus. Le but de l'étape décrite est donc de déterminer des groupes de cellules axées autour d'un même sommet pivot.

On remarque que ces clusters de parcelles semblent être des sous-graphes complets maximaux. Dans un premier temps, l'utilisation de l'algorithme de Bron-Kerbosch a été envisagé (et appliqué, inutilement !) mais certains cas particuliers nous laisse entrevoir le fait qu'une contrainte supplémentaire est manquante. En effet, la recherche d'une clique maximale par l'algorithme cité



FIGURE 16

ne prend pas en compte la nécessité que les cellules du cluster partagent un sommet. Sur l'exemple de la figure???, quatre cellules forment une clique sans pour autant avoir un sommet de Voronoï en commun.

Puisque que l'algorithme de Bron-Kerbosch se révèle inadapté à l'usage que l'on souhaitait en faire, il a été nécessaire de réfléchir à une autre méthode pour déterminer la position des carrefours et, surtout, les parcelles à y associer. Une procédure a donc été mise en place pour détecter ces clusters de parcelles pivotant autour d'un même croisement. L'idée de base est de construire tous les groupes de parcelles tels que :

- Toutes les parcelles d'un groupe soient voisines entre elles
- Les groupes soient maximaux
- Les parcelles d'un groupe aient tous un sommet en commun

Le dernier critère est la contrainte manquante à la définition des cliques maximales. Concrètement, la construction de toutes ces listes se résume à la construction de tous les cycles BLABLA. Ensuite, ROUTES.

Un désavantage de cette méthode, outre sa complexité algorithmique, est que seules les arêtes partagées par au moins deux parcelles deviennent des routes. Ainsi, on remarque que les arête délimitant la bordure de la ville (celles à l'extérieur du diagramme de Voronoï) sont absentes. Il semble pourtant nécessaire que toutes les arête du diagramme deviennent de potentielles voies car, dans notre modèle, la route est le support du bâti. Et si aucune route ne peut se construire à la bordure de la ville, aucun bâtiment ne s'y installera et la ville ne grandira jamais.

Une solution MAIS

Finalement, nous nous sommes tournés vers une solution plus claire, plus simple et permettant de transformer en routes potentielles toutes les arêtes sans exception : la construction puis la fusion de sous-réseaux routiers. Dans



FIGURE 17

le cadre de la tentative précédente, chaque carrefour était identifié est placé dans le graphe viaire sous la forme d'un nœud mais la phase de placement des routes (la liaison des nœuds par des arêtes) se faisaient une fois tous les croisements placés. Il est clairement plus simple de créer pour chaque parcelle un sous-réseau routier composé de ses propres sommets et de les relier immédiatement. Une fois tous ces petits graphes créés on les fusionnent tous en prenant comme critère d'identification des sommets leur position. On obtient au final un réseau routier complet duquel aucune arête ne manque.

IMAGE

## 5 Mesures

HEUUUUUUUU...

DEGRE DES CARREFOURS

ELOIGNEMENT DE LA DENSITE PAR RAPPORT AU CENTRE  
GEOMETRIQUE

ELOIGNEMENT DE LA DENSITE PAR RAPPORT AUX CENTRES  
TAILLE DES PARCELLES ? (BIAIS AU BORD)

## 6 Conclusion

RESUME

CONSTAT

PERSPECTIVES (DYNAMIQUES INTERNES, REALISME, INTER-  
PRETATION, VRAIE VILLE)

## Références

- [1] Martin GARDNER. “The fantastic combinations of John Conway’s new solitaire game ”life””. Dans : *Scientific American* 223 (1970).
- [2] Niloy GANGULY et al. *A Survey on Cellular Automata*. Rap. tech. 2003.
- [3] U. FRISCH, B. HASSLACHER et Y. POMEAU. “Lattice-gas Automata for the Navier-Stokes equation”. Dans : *Physical Review Letters* 56 (1986).
- [4] A.R. KANSAL et al. “Cellular automaton of idealized brain tumor growth dynamics”. Dans : *BioSystems* 55 (2000).
- [5] Waldo TOBLER. *Cellular Geography*. Rap. tech. International Institute for Applied Systems Analysis, 1975.
- [6] S.C. FU et George MILNE. “Epidemic modelling using cellular automata”. Dans : *Proc. of the Australian Conference on Artificial Life*. 2003.
- [7] Thomas C. SCHELLING. “Models of segregation”. Dans : *The American Economic Review* 59 (1969).
- [8] Anthony Gar-On YEH et Xia LI. “Urban simulation using neural networks and cellular automata for land use planning”. Dans : *Symposium on Geospatial Theory, Processing and Applications*. 2002.
- [9] Paul M. TORRENS et David O’SULLIVAN. “Cellular automata and urban simulation : where do we go from here ?” Dans : *Environment and Planning B : Planning and Design* 28 (2001).
- [10] Roger WHITE. “Cities and cellular automata”. Dans : *Discrete Dynamics in Nature and Society* 2 (1997).
- [11] Lucien BENGUIGUI, Daniel CZALANSKI et Rafael ROTH. “Modeling cities in 3D : a cellular automaton approach”. Dans : *Environment and Planning B : Planning and Design* 3 (2004).
- [12] Jeremy CORNU et Adrien DELCOURT. *Simulation de la dynamique spatiale urbaine par automate cellulaires*. 2008.
- [13] Tom LECHNER, Seth TISUE et Andy MODDRELL. *Procedural Modeling of Urban Land Use*. Rap. tech. Department of Computer Science, North Carolina State University, 2007.

- [14] Edwige DUBOS-PAILLARD, Yves GUERMOND et Patrice LANGLOIS. “Analyse de l’évolution urbaine par automate cellulaire : le modèle SpaCelle”. Dans : *L’Espace géographique* 32 (2003).
- [15] Ferdinando SEMBOLONI. “The dynamic of an urban cellular automata in a 3-D spatial pattern”. Dans : *XXI National Conference Aisre, Regional and Urban Growth in a Global Market*. 2000.
- [16] David O’SULLIVAN. “Graph-based Cellular Automaton Models of Urban Spatial Processes”. Thèse de doct. Bartlett School of Architecture et Planning, University College London, 2000.
- [17] David O’SULLIVAN. “Exploring Spatial Process Dynamics Using Irregular Cellular Automaton Models”. Dans : 33.1 (2001).
- [18] P. QUELOZ, B. CHOPARD et Luthi P. O. “Cellular automata model of car traffic in a two-dimensional street network”. Dans : *Journal of Physics A : Mathematical and General* 29 (1996).
- [19] Thomas LECHNER et al. “Procedural City Modeling”. Dans : *1st Mid-western Graphics Conference*. 2003.
- [20] Thomas LECHNER et al. *Procedural Modeling of Land Use in Cities*. Rap. tech. Computer Science Department, Northwestern University, 2004.
- [21] George KELLY et Hugh MCCABE. “Citygen : An Interactive System for Procedural City Generation”. Dans : *Game Design & Technology Workshop*. 2006.
- [22] Yoav I. H. PARISH et Pascal MÜLLER. “Procedural Modeling of Cities”. Dans : *SIGGRAPH ’01*. 2001.
- [23] Guoning CHEN et al. “Interactive Procedural Street Modeling”. Dans : *SIGGRAPH ’08*. 2008.
- [24] Basil WEBER et al. “Interactive Geometric Simulation of 4D Cities”. Dans : *Eurographics*. 2009.
- [25] Geoffrey EDWARDS. “The Voronoi Model and Cultural Space : Applications to the Social Sciences and Humanities”. Dans : *COSIT*. 1993.
- [26] Santiago GARRIDO et al. “Path Planning for Mobile Robot Navigation using Voronoi Diagram and Fast Marching”. Dans : *IROS*. 2006.
- [27] Rachel THOMAS. *Uncovering the cause of cholera*. <http://plus.maths.org/content/uncovering-cause-cholera>. 2010.

- [28] *JTS Topolgy Suite*. <http://www.vividsolutions.com/jts>. par Vivid Solutions.