
MoGUS, un outil de modélisation et d'analyse comparative des trames urbaines

Dominique Badariotti, Cyril Meyer, Yasmina Ramrani

Laboratoire LIVE UMR7362, CNRS/Université de Strasbourg, 3 rue de l'Argonne, F-67000 Strasbourg, France

dominique.badariotti@live-cnrs.unistra.fr ; cyril.meyer@etu.unistra.fr ; yasmina.ramrani@live-cnrs.unistra.fr

RÉSUMÉ. Dans cet article, les auteurs proposent un modèle et une méthodologie d'analyse des trames urbaines, en tant qu'ensembles d'unités morphologiques bâties articulées entre elles par les réseaux urbains. Le cœur de l'article présente le modèle MoGUS (Model Generator & analyser for Urban Simulation) et sa formalisation. Ce modèle représente conjointement les immeubles et les réseaux viaires d'une ville sous forme de graphe, et permet une analyse comparative des propriétés de trames urbaines différentes à l'aide d'indices dérivés. Un plan d'étude, appliqué à quatre types de trames urbaines archétypales (hippodaméenne, médiévale, radio-concentrique, haussmannienne) générées avec l'outil MoGUS, est présenté à titre d'illustration des possibilités du modèle.

ABSTRACT. In this paper, we propose a model and a methodology for the analysis of urban fabrics, sets of built morphological units articulated together by urban networks. The core of the paper presents the MoGUS model (Model Generator & analyser for Urban Simulation) and its formalization. This model jointly represents the buildings and the viaries networks of a city in a graph, and allows a comparative analysis of the properties of different urban fabrics, using derived indicators. A study plan applied to four types of archetypal urban fabrics (Hippodamean, medieval, radio-concentric, Haussmannic) generated with the MoGUS tool is presented to illustrate the possibilities of the model.

MOTS-CLÉS : urbanisme, trame urbaine, forme urbaine, semis d'immeubles, réseau viaire, graphes, modèle.

KEYWORDS: Urbanism, Urban fabric, Urban form, Building seedlings, Road network, Graphs, Model.

DOI: 10.3166/riq.2021.00109 © 2020 Lavoisier

1. Introduction

Dans cet article, nous nous intéressons aux « trames urbaines », en tant qu'ensembles de plans ou tracés associés à la disposition des immeubles, et relevant des « formes urbaines » au sens de Conzen et Robert (1960) ou d'Alexander (1965). Les trames urbaines étudiées sont ici des ensembles d'unités morphologiques bâties, articulées entre elles par les réseaux urbains.

Par « unités morphologiques bâties » nous entendons tous les immeubles de la ville, quels que soient leurs usages ou leurs destinations. Par « réseaux urbains » nous entendons tous les réseaux qui permettent de cheminer à travers la ville et d'aller d'un immeuble à l'autre, pour quel que motif que ce soit. Il s'agit donc principalement du réseau viaire, c'est-à-dire du réseau des rues, allées, boulevards, places, etc., tel qu'il figure sur le plan de la ville. Ce réseau, si on exclut le train, le métro et le téléphérique, est le support de tous les déplacements urbains, quel que soit le mode.

Nous proposons dans cet article un outil – l'outil MoGUS (*Model Generator & analyser for Urban Simulation*) développé en C++ au laboratoire LIVE, UMR 7362 du CNRS – et une méthode permettant une étude comparative de ces « trames urbaines » entre elles. Pour présenter cet outil, il est nécessaire d'évoquer avant tout notre positionnement scientifique sur le concept de « trame urbaine » que nous utilisons. Par la suite nous présentons l'outil MoGUS, ses indices et son générateur de trames. Enfin, nous terminons par la présentation d'une application de MoGUS à des trames urbaines typiques, à titre d'illustration.

2. Trame urbaine

Pourquoi s'intéresser à la trame urbaine ? Batty écrit que « pour comprendre un lieu, nous devons comprendre les flux, (...) et pour comprendre les flux, nous devons comprendre les réseaux. Les réseaux suggèrent des relations entre les hommes et les lieux (..) relations essentielles entre les objets qui constituent le système qui nous intéresse » (Batty, 2013, p. 20). Lorsque Batty parle ainsi des « réseaux », il parle précisément de la « trame » de Reymond et Racine (1973), c'est-à-dire d'une organisation géographique particulière, qui décèle dans sa forme même des possibilités qui s'exprimeront au niveau systémique.

En effet, pour Racine et Reymond la « trame » s'associe aux « liaisons » (échanges par le réseau viaire entre les éléments, quelle que soit la nature de ces échanges) et à la « transformation » (introduction du temps et donc des processus dans le schéma), pour former un système dès lors que ces processus sont contrôlés. On voit donc bien que la trame est un niveau d'analyse dans l'organisation systémique des espaces géographiques, et que ce niveau, dans une certaine mesure, conditionne le système, au même titre que le processus par exemple. Raison de plus pour s'y intéresser et pour développer des outils d'analyse de ces formes qui permettent d'analyser l'ensemble du système en ses potentialités dynamiques.

2.1. Trame urbaine : éléments de définition et approches

En français, le mot « trame urbaine » renvoie tantôt à l'organisation géographique des villes à l'échelle d'un pays (Saint-Julien, 1981) : il s'agit alors de la configuration spatiale du réseau urbain, à savoir du maillage des villes dans le pays. Tantôt, il renvoie à l'organisation spatiale des tissus urbains à l'échelle d'une ville (Laterrasse, 2018) : il s'agit alors de la matrice même de la forme urbaine, de son treillage spécifique qui va être une composante importante des paysages urbains qui vont en résulter. C'est bien dans cette seconde acception, très répandue dans le milieu des urbanistes, que nous nous situons.

Notons qu'en anglais, le concept de trame urbaine se traduit en général mal. Souvent on trouvera les mots de « urban pattern » ou « urban fabric », qui correspondent peu ou prou au concept que nous suivons. Mais on trouve aussi « urban framework » qui renvoie davantage à la hiérarchie urbaine, ou au système de villes ; ou encore « urban greenway » qui évoque plus précisément la trame verte, et « urban layout » qui traduit davantage le dessin, la forme, du réseau de rues.

La trame urbaine peut se formaliser par les tracés urbains, à savoir les plans des villes, auxquels on rajoute le positionnement des immeubles. Ces tracés ou plans, associés à la disposition des immeubles, constituent pour nous la *trame urbaine*. À partir de là, l'analyse de la trame urbaine consiste en l'étude de l'organisation spatiale de « réseaux viaires » reliant des « immeubles », cette organisation étant appréciée tant du point de vue de la topologie que du point de vue de la distance métrique explicite d'immeuble à immeuble, calculée sur le déployé des rues. Ce positionnement topologique et géométrique est dans la mouvance et les héritages des recherches sur la forme urbaine développées par l'ISUF (*International Seminar on Urban Form* ; Vernez-Moudon, 1997) qui l'a théorisée ; ou de celles de Levy (2005) ou de Fusco (2018) qui en ont catégorisé les différents aspects.

Relevons qu'associer disposition des immeubles et réseau viaire a un sens du point de vue de la morphologie urbaine, sens que détaille Brès (1998) lorsqu'il plaide pour appréhender conjointement l'espace de la ville et ses réseaux urbains. Mais cela a aussi une incidence du point de vue du fonctionnement urbain. En effet, des bâtiments proches à vol d'oiseau, ou contigus du point de vue cadastral, leurs parcelles se touchant par l'arrière, peuvent être peu accessibles entre eux en raison de la configuration du cheminement nécessaire pour aller de l'un à l'autre. Il est donc important de prendre en compte conjointement la disposition des immeubles et leurs liens au réseau viaire.

Ainsi, on voit bien que ce qui importe est moins la disposition des immeubles dans un espace euclidien sans réseau viaire, que la façon dont le réseau viaire va relier ces immeubles selon leur disposition, créant ainsi une « adhérence » du réseau aux masses bâties (et inversement), pour reprendre un terme proposé par Amar (1993). C'est précisément l'objet de la trame urbaine que de représenter cela, conceptuellement et formellement, en associant la localisation précise des immeubles, et les divers cheminements possibles à travers la ville pour les relier.

2.2. Analyses de la trame urbaine : état de l'art

Formellement rappelons qu'une trame urbaine, selon notre acception, est composée de deux types d'éléments : le semis des immeubles et le plan de la ville représentant les rues et les chemins permettant de relier les immeubles entre eux. Ces deux éléments combinés forment la trame de toute ville. Comment les caractériser ? Leur analyse renvoie davantage aux méthodes d'analyse de la forme urbaine, qu'aux méthodes d'analyse des réseaux, ces derniers étant en général sous-tendus par la question du transport ou de la mobilité (Dupuy, 1991).

Au-delà du commentaire qualitatif, toujours intéressant mais difficilement comparable, certains auteurs ont développé des indices morphométriques pour tenter de caractériser ces trames (Hamaina *et al.*, 2012a), le but étant de pouvoir les comparer de la manière la moins ambiguë possible.

Une première famille d'indices s'intéresse davantage à l'organisation de l'espace urbain, entendez la disposition des immeubles. Elle se base sur des indices assez divers qui renvoient : soit à de simples calculs de densité d'occupation du sol ; soit à des méthodes de généralisation cartographique (Boffet et Serra, 2001) ; soit encore à des indices morphologiques plus évolués permettant d'exprimer par exemple l'intensité de l'occupation du sol urbain (Berghauser-Pont et Haupt, 2007), ou alors sa composition à l'aide des indices de la métrique paysagère (McGarigal et Marks, 1995 ; Tran *et al.*, 2014), ou encore les densités d'immeubles (Abarca-Alvarez *et al.*, 2019) ; soit enfin à des indices morphométriques permettant d'exprimer la structuration fondamentale des espaces analysés à l'aide de fractales (Frankhauser *et al.*, 2010). Toutes ces méthodes sont évidemment intéressantes, mais elles présentent l'inconvénient d'étudier les dispositions relatives des immeubles en faisant abstraction des rues qui les organisent. La trace des rues s'inscrit en négatif dans ces analyses, comme un vide, et la connexion des immeubles aux rues n'est pas explicitement prise en compte.

Un autre courant de pensée s'est attaché à décrire davantage les réseaux urbains eux-mêmes, souvent modélisés sous forme de graphes. Cette approche est l'héritière directe de travaux apparus aux États-Unis, qui s'intéressaient principalement aux propriétés topologiques des réseaux de transports (Kansky, 1963). Selon Lagesse *et al.* (2016) divers volets ont été successivement explorés : démarrant dans les années 1960 avec des travaux essentiellement topologiques focalisés sur la notion de centralité (Haggett et Chorley, 1969 ; Werner, 1971) ; évoluant au cours des années 1980 vers des travaux intégrant les questions de flux et de connexion (Vaughan, 1987) ; et aboutissant dans les années 2000 à des recherches s'intéressant à des graphes de plus en plus étendus (Albert et Barabasi, 2002). La prise en compte de la géométrie des réseaux urbains s'est effectuée plus tardivement et en parallèle de ces recherches topologiques : dès le début elle a focalisé sur des questions paysagères, intégrant la perception et la représentation psychologique des réseaux par l'utilisateur (typiquement un piéton) et les comportements que cela pouvait induire (Hillier *et al.*, 1993).

Tentant de dépasser ces clivages, Porta *et al.* (2006) ont plaidé pour le développement d'une analyse renouvelée des réseaux urbains à la fois topologique et géométrique. Ils suggèrent une représentation topologique en graphes des réseaux viaires, mais qui prendrait directement en compte leur géométrie au travers de la distance métrique et en utilisant des indices de centralité pour qualifier ces réseaux. Plusieurs auteurs ont suivi cette voie, cherchant à mieux définir les propriétés géométriques des réseaux urbains (Strano *et al.*, 2013), visant à les décrire à la fois topologiquement et géométriquement en les confrontant à des graphes mathématiques abstraits (Tirico, 2020), ou à des modèles d'urbanisme réels (Hachi, 2020) ; ou encore développant des études morphométriques (Hamaina *et al.*, 2012a, 2012b) parfois comparatives et qui ont conclu à un lien fort entre réseau viaire, espace social et espace bâti (Venerandi *et al.*, 2017). Beaucoup d'articles et de travaux portent sur des questions de transport ou de mobilité, la pensée des réseaux urbains étant fortement sous-tendue par ces thématiques, allant parfois jusqu'à confondre le support (la voie) et son usage temporaire (la mobilité mécanique). Mais très souvent ces approches ont ignoré ou minimisé l'empreinte des bâtiments au sein de ces réseaux.

2.3. Analyses de la trame urbaine : approche proposée

Or, rues et espaces bâtis se développent conjointement, comme l'observe Brès (1998) : « on n'est pas simplement passé "de l'îlot à la barre"... mais aussi, et simultanément, de la rue à la voie rapide et à son pendant, la voie de desserte en cul-de-sac ». L'approche par les immeubles pris isolément, ou l'approche uniquement par les réseaux, ne rendent compte à chaque fois que d'un aspect du problème. Il est nécessaire de les penser ensemble et de les prendre en compte conjointement dans une modélisation de la trame urbaine. Le véritable intérêt est bien de conserver une approche holistique de la trame, et de chercher à voir quelles propriétés une trame développe à l'échelle de son déploiement d'ensemble, immeubles et rues confondus. C'est l'objectif de l'analyse configurationnelle.

Rappelons que l'approche configurationnelle consiste en la prise en compte du système de toutes les distances entre les éléments urbains, et non seulement de la distance entre ces éléments pris deux à deux (Fusco, 2018, p. 102). C'est en effet dans cet « espace » des distances que vont se développer les liaisons, et donc les processus et les transformations du système urbain. Pour appliquer les principes et concepts de l'approche configurationnelle à notre objet, et tenter d'aller plus loin dans la mise au point d'indices morphométriques holistiques et pertinents, nous proposons d'analyser les trames urbaines selon les grandes variations que l'on peut trouver dans ses deux composantes fondamentales : le semis des immeubles et le plan viaire de la ville. Le tout étant représenté sous forme de graphe.

Nous proposons ainsi de décliner chacune de ces composantes d'une part, en faisant varier le semis d'immeubles, testant ainsi l'effet de plusieurs types de semis emblématiques d'immeubles (régulier, concentré au centre et dispersé en périphérie,

aléatoire, etc.) ; et d'autre part, en appliquant plusieurs types de plans viaires archétypaux (hippodaméen, radioconcentrique, médiéval, haussmannien) à ces semis. Chaque variation permettra de construire un graphe des immeubles reliés entre eux par les rues, l'objectif étant de comparer ces divers graphes entre eux, correspondant aux différentes trames urbaines possibles.

L'idée est bien d'analyser conjointement les déclinaisons obtenues de semis d'immeubles et de plans viaires, mis en relation deux à deux et modélisés sous forme de graphes. Pour cela, il est nécessaire de développer un outil d'analyse, susceptible de calculer des indices prenant en compte ces deux composantes simultanément : c'est l'objectif de l'outil MoGUS.

2.4. Analyses de la trame urbaine : limitations

Il convient ici d'éclaircir et de limiter notre approche. La trame urbaine, telle qu'elle est présentée, peut aussi correspondre au champ applicatif de la mobilité sur réseau viaire et entre lieux de vie et d'activités (bâtiment / immeuble). Toutefois, notre objet d'étude principal n'est pas la mobilité, mais bien la caractérisation de cette trame, même si nous convenons que les propriétés de ces trames seront incidentes sur les mobilités (Badariotti *et al.*, 2017).

Ainsi, la question est d'étudier les propriétés du réseau viaire urbain en fonction de la localisation des immeubles, quelles que soient leurs implications dans les origines et destinations des déplacements. De ce fait, notre choix est de ne pas parler précisément de mobilité car cela ouvre tout un champ de questionnements, très intéressants mais en marge de notre recherche. Et ceci, bien qu'il soit évident que la question de la mobilité est présente en filigrane dans notre recherche.

Conséquence de notre choix, le type de mobilité n'a pas non plus été abordé explicitement, puisque le modèle permet de décrire toutes les mobilités de surface (voitures, piétons, etc.) sur voirie et infrastructures – hormis les téléphériques urbains, car ils sont encore très peu répandus. Tous les passages, toutes les rues, toutes les voies, tous les ponts et tunnels sont en effet représentés et pris en compte, alors que bien évidemment, selon le type de mobilité considéré l'ensemble de la trame ne sera pas utilisable par tout usager.

Par exemple, en cas de mobilité essentiellement voiture, le dimensionnement de la voirie et la réglementation (voies piétonnes, sens interdits) changent bien entendu le graphe. Et il en est de même pour les piétons et les vélos, qui peuvent dans l'absolu aller partout et dans n'importe quel sens, mais à qui on va recommander de ne pas prendre les rocade, périphériques et autres autoroutes urbaines.

Donc nous nous sommes placés dans le cas le plus général, sachant que selon le type de mobilité étudié, il faudra travailler sur un sous-ensemble de notre modèle.

3. L'outil MoGUS – présentation d'ensemble

L'outil MoGUS a été conçu pour représenter la trame urbaine sous forme de graphe, afin d'en faciliter la représentation, l'analyse et la caractérisation dans le but d'en comparer les propriétés holistiques et/ou de détail d'une ville à l'autre.

Techniquement, MoGUS est un prototype organisé en quatre composantes logicielles : *MoGUS-core* le module de traitement, *MoGUS-cli* l'interface utilisateur en ligne, *MoGUS-gui* l'interface utilisateur graphique, et *MoGUS-test* le système de tests automatiques. Il a été développé en C++ avec un appel limité aux bibliothèques pour en assurer la portabilité et la longévité. Il s'interface aisément avec des SIG, dont il lit et écrit les *shape-files*, et avec des tableurs en sortie. Il est prévu de le mettre en *open-source* après une première phase d'exploitation (Meyer, 2019).

Nous allons respectivement présenter ci-après la conception générale de MoGUS, et la construction de sa modélisation spécifique.

3.1. Conception générale de MoGUS

La conception générale de MoGUS part d'une représentation SIG de la trame urbaine, qui va être modélisée sous forme de graphes. Ce système de modélisation est similaire dans sa conception à la modélisation faite pour l'outil REMUS (*REticular Model for Urban Simulation*) auquel nous renvoyons pour plus de détails (Badariotti *et al.*, 2007, 2009 ; Moreno *et al.*, 2009).

MoGUS gère différentes couches pour réaliser sa modélisation (figure 1). On y trouve respectivement :

- **Une couche dite SIG (système d'information géographique)**, issue d'une représentation SIG dont on ne conservera que les routes et bâtiments sous formes d'objets géométriques dans un espace. Les routes correspondent à l'axe central du réseau routier urbain, et les bâtiments sont décrits par leurs contours, dont on peut abstraire un point central.

- **Une couche GU (graphe urbain)** qui représente la ville sous forme de graphe, dont les sommets correspondent aux carrefours du réseau viaire et aux bâtiments, et dont les arcs sont constitués des tronçons de route. Ce graphe est pondéré (les nœuds et les arêtes peuvent être valués) ; orienté (les liens entre deux nœuds ne sont pas forcément symétriques pour prendre en compte les sens interdits, le cas échéant) ; et connexe (tous les nœuds sont reliés à tous les nœuds au sein du même graphe).

- **Une couche GC (graphe complet)** qui reprend sous forme de graphe les plus courtes distances calculées entre toutes les intersections du GU. La couche GC est ainsi une couche d'information supplémentaire au GU. De fait, dans cette couche, on calcule les plus courtes distances entre toutes les intersections de rues ; mais comme on connaît la distance de chaque immeuble à ses deux intersections les plus proches par la géométrie, on peut par simple addition connaître les plus courtes distances de tous les

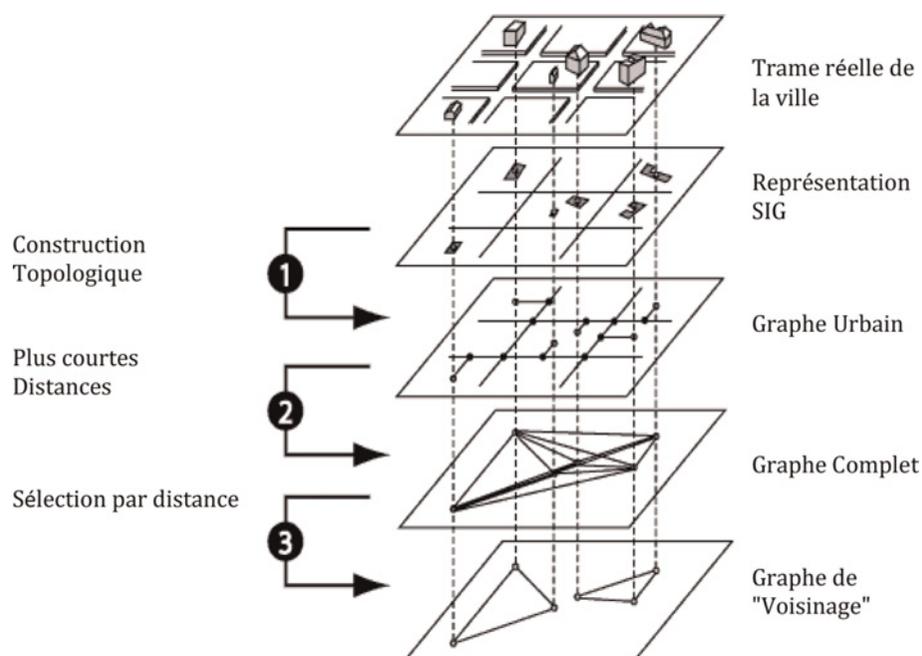


Figure 1. Couches et étapes de construction des graphes urbain, complet, et de voisinage dans MoGUS en partant d'une représentation SIG de la trame urbaine (d'après Badariotti et al., 2007)

immeubles à tous les immeubles. Cette méthode permet d'optimiser considérablement le temps de calcul puisqu'il y a bien moins d'intersections que d'immeubles dans le graphe urbain.

– De ces trois couches de base, on peut ensuite inférer une multitude de **graphes de voisinages (GV)** permettant d'explorer les voisinages selon des seuils de distance déterminés.

3.2. Étapes de modélisation dans MoGUS

La modélisation développée dans MoGUS permet le calcul d'indices, notamment à partir du graphe complet GC, afin de caractériser les trames et les formes urbaines. Certains indices implémentés sont directement inspirés des indices de graphe utilisés pour caractériser des réseaux (Kansky et Dancoisne, 1989 ; Gleyze, 2001 ; Ducruet, 2010) ; nous reviendrons sur ces derniers. Cependant, pour construire la couche GC qui va alimenter ces indices, il faut dans un premier temps modéliser la trame urbaine sous forme de graphe, et construire ce que nous avons appelé « le graphe urbain ».

3.2.1. Construction du graphe urbain

Partant d'une représentation SIG de la trame urbaine, dans laquelle n'apparaissent que les immeubles, et les voies avec leurs intersections, il nous faut d'abord transformer les routes en arcs (arêtes ou *edges*) et leurs intersections en nœuds (sommets ou *vertices*) pour construire un graphe. Pour cela nous utilisons une stratégie proche de celle formalisée par Lagesse *et al.* (2016), qui consiste à déconstruire les routes pour les réduire aux unités élémentaires qui les composent, à savoir leurs segments qui représentent les sections de rues entre deux carrefours et leurs extrémités formées par ces intersections. Ensuite, nous raccordons les bâtiments à ce graphe formé des portions de rues orientées et de leurs intersections.

On obtient ainsi un **graphe urbain**, à savoir une représentation de la trame urbaine sous forme de graphe avec une simplification des voies. Le calcul du graphe urbain se fait en 4 étapes :

- *Positionnement des éléments géométriques* (points et segments) issus du SIG dans un nouvel espace à précision fixe (on évite les précisions flottantes pour des raisons de temps de calcul). Les routes deviennent des arcs et leurs intersections les nœuds du graphe.

- *Projection des bâtiments sur les routes*, et calcul de leur distance aux deux intersections les plus proches, auxquelles les bâtiments seront affectés. Pour chaque bâtiment, on calcule la distance orthogonale entre le centre du bâtiment et les segments qui l'entourent ; on ne retient que le segment le plus proche, sur lequel le bâtiment sera définitivement projeté. On calcule ensuite la distance réelle entre le bâtiment et chacun des nœuds de ce segment le plus proche ; puis, on sauvegarde ces distances en les identifiant aux deux intersections les plus proches (voir figure 2b), le bâtiment étant dès lors affecté à ces deux intersections.

Dans la mesure où il s'agit d'un modèle général, on ne tient pas explicitement compte des parkings ni des espaces à traverser pour aller du bâtiment à la rue. Toutefois ces espaces sont indirectement pris en compte puisqu'on calcule bien la distance réelle du centre moyen de chaque bâtiment à ses deux intersections les plus proches, en traversant d'éventuels parkings ou avant-jardins.

- *Connexion du graphe*. Cette étape permet de transformer notre graphe en un graphe connexe s'il ne l'était pas. En effet, des erreurs de saisie lors de la numérisation des fonds utilisés peuvent empêcher le graphe de se connecter, par exemple en ne rattachant pas une rue à l'ensemble du réseau viaire, ou en plaçant des points représentant une intersection à quelques millimètres les uns des autres. Cette étape va donc rajouter des arcs si nécessaire : ceux-ci permettront de connecter des chemins privés au réseau des rues, ou de relier des points extrêmement proches pour rétablir des connexions qui existent dans la réalité, mais qui sont absentes des cartes numérisées (figure 2a). La méthode est tout à fait classique : il s'agit de repérer les nœuds extrêmement proches dans un rayon donné, et de les confondre. Le risque de connecter des points qui ne devraient pas l'être est minime, car les rayons pris en compte pour

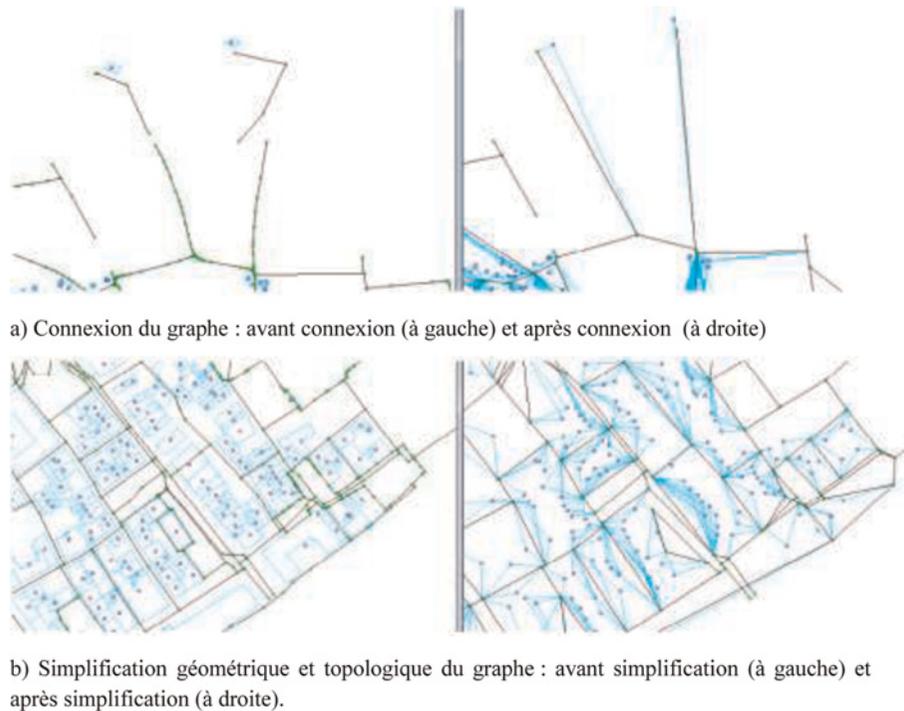


Figure 2. Représentation des opérations de connexion et de simplification topologique du graphe

confondre des points sont très petits. On peut en outre procéder à une vérification visuelle en comparant les fonds d'origine et les fonds connectés de MoGUS.

– *Simplification géométrique et topologique du graphe.* Deux simplifications sont ici opérées conjointement. Une simplification géométrique du graphe urbain d'un côté, où on contracte tous les nœuds de degré 2 dans un souci d'optimisation. Un nœud de degré 2 est un point intermédiaire entre deux intersections qui marque uniquement un changement de direction sans aucune connexion à un autre arc : Lagesse *et al.* (2016) parlent à ce propos de « points annexes ». Et une simplification topologique d'un autre côté, où on supprime tous les nœuds inutiles, y compris les projections des immeubles sur les arcs les plus proches, pour ne garder qu'un lien direct entre chaque immeuble et ses deux intersections les plus proches.

Les simplifications géométrique et topologique n'affectent pas les distances, qui ont été calculées au préalable : elle ne font que supprimer des nœuds inutiles, ce qui ne change rien à l'exactitude des distances entre les intersections (figure 2b), ni entre les immeubles. Elle répond à deux objectifs : supprimer le biais apporté par les courbes (simplification géométrique) ; et réduire le nombre de nœuds dans le graphe, en se concentrant sur les nœuds correspondant aux intersections d'arcs (simplification topologique).

À présent, il est possible de calculer le graphe complet (GC) représentant toutes les plus courtes distances d'intersection à intersection et d'immeuble à immeuble.

3.2.2. Construction du graphe complet

À partir de la représentation simplifiée du graphe urbain (GU) obtenue, on construit un **graphe complet**, à savoir un graphe qui va représenter tous les liens de bâtiment à bâtiment par la plus courte distance et par le réseau viaire. Ceci se fait en deux étapes :

- Calcul des plus courtes distances d'intersection à intersection. Comme nous sommes dans le cas particulier d'un graphe orienté avec poids des arcs strictement positifs, il ne peut y avoir de circuits de poids strictement négatifs : nous pouvons donc appliquer directement l'algorithme de Roy-Floyd-Warshall au calcul des plus courtes distances géographique entre les nœuds d'intersections du **graphe urbain**.

- Calcul des plus courtes distances d'immeuble à immeuble ; chaque immeuble forme en réalité un « méta-sommet » dans le graphe urbain. De fait, les immeubles ou bâtiments ne font pas directement partie du graphe urbain *mathematico sensu*, c'est pour cela que nous parlons de « méta-sommet » ; mais ils y sont reliés pour pouvoir être utilisés dans notre modélisation. Ainsi chaque immeuble connaît sa distance géographique avec les intersections (nœuds) les plus proches ; comme on connaît la distance géographique exacte entre toutes les intersections, cela suffit pour évaluer la distance géographique exacte entre tous les bâtiments.

Le calcul des plus courtes distances entre immeubles pour construire le graphe complet, se réduit ainsi à rattacher chaque immeuble à une intersection proche du bâtiment et à « regarder » la distance entre les intersections. Nous obtenons ainsi une représentation définitive de ce graphe complet sous la forme d'une matrice d'adjacence représentant toutes les plus courtes distances d'immeuble à immeuble, *via* le réseau routier initial.

4. Les indices calculés par MoGUS

Après avoir réalisé ces étapes de construction des graphes, nous calculons des indices globaux à partir du graphe complet. Ces indices globaux sont inspirés de la littérature, mais aussi guidés par nos propres intuitions. Concernant les indices topologiques de graphe, ils découlent du travail initiateur de Karl Kansky (1963), relevés et rapportés par Dancoisne (1989) et plus récemment par Beauguitte (2020).

Karl Kansky, dans sa thèse soutenue en 1963, a défini 18 indices basés sur des graphes pour caractériser la structure d'un réseau. Comme l'auteur le reconnaissait lui-même, selon Dancoisne (1989), ces indices ne signifient rien dans l'absolu s'ils ne sont pas confrontés à des données empiriques. D'autres indices ont été développés ou proposés par la suite. Ducruet (2010) en propose un certain nombre en reprenant pour partie ceux de Kansky et en les distinguant selon leur champ d'application : mesures locales ou globales, de voisinage ou d'ensemble. Lagesse *et al.* (2016) en définissent

d'autres, de façon très rigoureuse, en cherchant à les relier aux concepts habituels de la desserte et de l'accessibilité. On peut également citer le rapport fait par Jean-François Gleyze (2001), qui correspond à une synthèse des différents concepts et indices issus de la théorie des graphes et utiles pour caractériser des réseaux.

Tous les indices de la littérature n'ont pas été utilisés. Mais nous avons néanmoins décidé d'implémenter les trois premiers indices de Kansky – alpha, beta et gamma – car ils permettent de qualifier la trame urbaine modélisée dans son ensemble, dans une perspective informative ou comparative.

Par ailleurs nous avons également retenu d'autres indices, élaborés directement à partir des données que nos modèles nous permettent de constituer. Tout ceci constitue un premier jeu, expérimental, d'indices : nous n'en avons pas implémentés d'autres pour l'instant, pensant d'abord exploiter ceux-ci pour vérifier la pertinence de notre modèle pour une analyse d'ensemble des différentes trames.

4.1. Les indices généraux de cadrage

Des indices de cadrage sont calculés pendant l'étape de construction du graphe urbain et du graphe complet. Ils concernent, et documentent, les trois niveaux d'information majeurs avec lesquels nous travaillons : le niveau du SIG, le niveau du graphe urbain et le niveau du graphe complet. Pour chacun de ces niveaux, nous calculons les indices suivants.

Au niveau du SIG :

- Nombre d'immeubles (SIG1) : Nimm,
- Nombre de routes (SIG2) : Nr,
- Nombres de segments de routes (SIG3) : Nsr,

Au niveau du graphe urbain :

- Somme de longueur des arcs/routes (GU1) : SLr,
- Nombre de nœuds de routes (GU2) : Nnr,
- Nombre d'arcs de routes (GU3) : Nar,

Au niveau du graphe complet :

- Somme des distances de bâtiments à bâtiments (GC1) : SDb2b,
- Somme des distances de nœuds à nœuds (carrefours) (GC2) : SDn2n.

Comme on peut le constater, nous ne calculons dans MoGUS que quelques indices qui nous permettront de construire par la suite les indices comparatifs dont nous aurons besoin. Certaines mesures, très courantes, sont cohérentes avec les indices de Kansky, comme le calcul du nombre de nœuds et du nombre d'arêtes du graphe urbain. D'autres mesures sont proches des indices de Kansky, mais pas totalement identiques, comme la

somme de longueur des arcs des routes qui ressemble à l'indice local de Shimbel, mais s'en distingue : l'indice de Shimbel calcule cette donnée nœud à nœud pour chaque nœud (d'où l'adjectif local), alors que nous le calculons globalement pour tout le graphe. Enfin, d'autres indices n'ont pas été exploités, comme le nombre cyclomatique, mais nous pourrions facilement les construire à partir des données calculées.

4.2. Les indices topologiques

Nous calculons directement les indices topologiques α (alpha), β (beta) et γ (gamma), définis par Kansky (Kansky, 1963, Kansky et Dancoisne, 1989), lorsque le nombre de nœuds et le nombre d'arcs du graphe sont calculés. Ces indices ont été utilisés pour caractériser des graphes (Ducruet, 2010 ; Ducruet et Lugo, 2013).

L'indice α (*alpha index*) est le rapport entre le nombre de cycles présents dans le graphe, sur le nombre maximum de « cycles » possibles. Dans un graphe non orienté, un cycle est une suite d'arcs consécutifs formant une chaîne dont les deux nœuds extrémités sont identiques. En d'autres termes, un cycle représente une boucle ou un circuit, ou encore une promenade fermée. L'indice α permet de mesurer la facilité pour un réseau de proposer des itinéraires alternatifs entre deux points, et décrit donc la plus ou moins grande « vascularisation » d'une trame. Dans un graphe complet où tous les nœuds sont reliés à tous les nœuds, il est égal à 1 ; à l'inverse dans un graphe sous forme d'arbre, ou pour un graphe strictement hiérarchique, il est égal à 0.

L'indice β (*beta index*) est le rapport entre le nombre d'arcs et le nombre de nœuds du graphe. β est le plus simple des indices que l'on puisse élaborer pour caractériser des graphes : il est inférieur à 1 pour les arbres et les graphes non connexes ; il est égal à 1 pour les graphes ne possédant qu'un seul cycle ; et il est supérieur à 1 pour les graphes plus complexes. Il mesure également la connectivité, ou la « vascularisation » d'une trame ; lorsqu'il s'élève au dessus de 1, il correspond à une trame où davantage de rues sont rabattues sur un même nombre de carrefours, ce qui suppose des carrefours plus complexes (étoiles, etc.).

L'indice γ (*gamma index*) est le rapport entre le nombre de liens du graphe et le nombre maximum de liens possibles. Il représente ainsi un indice de connectivité du réseau, et mesure la plus ou moins bonne exploitation des possibles par la trame urbaine.

4.3. Les indices pondérés

Dans une perspective comparative, au niveau du graphe complet GC, nous développons également deux indices calculés *a posteriori* qui permettent de comparer ces morphologies entre elles, toutes choses étant égales par ailleurs.

En effet, et pour ne rester que sur des trames urbaines archétypales, le déployé des rues d'un plan hippodaméen ou radioconcentrique par exemple n'est pas le même, ces

plans ayant des dimensions fractales différentes. Il convient donc de définir des indices de mise à l'échelle pour comparer ces plans et leurs propriétés. Ces indices pondérés sont d'autant plus souhaitables si on cherche par exemple à comparer des trames urbaines de villes réelles entre elles en s'affranchissant des éventuels effets de taille. Les indices suivants ont ainsi été définis.

Un indice dit « normé » IN : le total des distances d'immeuble à immeuble est pondéré par le produit des longueurs de route et du nombre d'immeubles.

$$IN = \frac{SDSDB2b}{SLr * Nimm} \quad (1)$$

Cet indice nous permet de voir, rapporté à l'immeuble et à la longueur des voies d'origines, si les distances d'immeubles à immeubles sont plutôt grandes ou plutôt petites, toutes choses étant égales par ailleurs. Si l'indice a une valeur petite, les distances d'immeubles à immeubles apparaîtront comme contenues, rapprochées, ce qui donne un sentiment de compacité. À l'inverse, si la valeur est grande, cela signifie que la trame analysée génère beaucoup de distances d'immeubles à immeubles, ce qui induit forcément un sentiment d'étalement ou d'écartement.

Si on veut améliorer l'indice IN que nous avons défini, il suffit de multiplier de façon très importante le nombre de voies. En effet, avec un très grand nombre de voies, les distances d'immeubles à immeubles vont progressivement se réduire, étant moins assujetties aux détours imposés par la trame, pour finir par approcher des distances proches de la ligne droite. Il convient donc de pondérer cet indice pour essayer de le modérer en fonction du nombre de voies présentes : c'est ce qui nous amène à définir un nouvel indice dit « indice d'efficacité ».

Un indice dit « efficacité » IE : il s'agit de l'indice normé pondéré par le nombre de segments de routes présent à l'origine (au niveau du SIG).

$$IE = \frac{IN}{Nsr} \quad (2)$$

L'idée ici est de voir si on peut obtenir un bon indice normé avec une parcimonie de voies à l'origine. Si l'indice normé IN est faible, et qu'il est en outre obtenu avec un faible nombre de voies à l'origine, l'indice d'efficacité IE sera grand et montrera que pour une compacité intéressante, un « bon » rapprochement des immeubles, l'investissement en termes de voirie initiale aura été modeste : on en déduira une bonne parcimonie de moyens pour une trame urbaine économe en distances.

4.4. Un indicateur synthétique

Enfin, nous avons également défini un indicateur, dit **synthétique IS**, qui permet de faire la synthèse entre les valeurs de IN et de IE.

En effet, par construction, les indices IN et IE jouent inversement : un IN faible, (forte proximité des immeubles) obtenu au prix d'un IE fort (multiplication pléthorique du nombre de voies), ne saurait être satisfaisant, et inversement. IN s'oppose donc dans une certaine mesure à IE, et cette opposition nous interpelle, car elle rend plus difficile la comparaison et le commentaire des résultats. C'est cette opposition qui nous amène à définir notre indicateur IS destiné à nous donner une appréciation synthétique pour chaque trame selon IN et IE.

On l'obtient en classant les n trames selon IN par rang croissant (RangC) : le rang du plus petit IN = 1 et celui du plus grand IN = n. Puis on classe les n trames selon IE en rang inverse, c'est-à-dire en rang décroissant (RangD) : le rang du plus grand IE = 1 et celui du plus petit IE = n ; rappelons que IE et IN jouent inversement (voir tableau 4, *infra*). On définit ainsi RangC et RangD comme les opérations qui donnent « le rang croissant ou décroissant ». Enfin, on calcule pour chaque trame la moyenne des RangC et des RangD obtenus pour trouver IS.

$$IS = \frac{RangC(IN) + RangD(IE)}{2} \quad (3)$$

Comme IS est basé sur des rangs et non sur des rapports de grandeurs mesurées, nous proposons de l'appeler « indicateur », réservant ainsi le mot « indice » à des calculs basés sur des rapports de grandeurs.

Tous les indices que nous avons évoqués (α , β , et γ ; IN et IE) qu'ils soient topologiques ou pondérés, sont calculés individuellement pour chaque trame urbaine soumise au modèle. Lorsqu'un plan d'expérience est lancé, supposant la mesure de ces indices sur plusieurs simulations, nous moyennons les indices calculés à des fins de caractérisation et de comparaison statistique.

Le calcul de l'indicateur IS est effectué tout à fait à la fin, sur la base des IN et IE finalement retenus.

5. Le générateur de trames urbaines synthétiques dans MoGUS

L'outil MoGUS a bien évidemment été construit pour lire des trames urbaines réelles, sous forme de fichier de type « shapefile » (format de fichier pour les SIG) et de les analyser. Cependant, dans la réalité, les formes urbaines sont très souvent composites, formées de plusieurs modèles d'urbanisme agglomérés, voire transformés. Aussi l'interprétation des analyses est toujours difficile et peut même être erronée si on ne réussit pas à se dégager des contingences propres à chaque site et à chaque histoire urbaine. Par ailleurs, nous manquons aussi de valeurs référentielles pour interpréter – or Kansky lui-même considérait que la confrontation de ses indices à des valeurs de mesure était nécessaire pour bien les interpréter.

Pour ces raisons, nous avons conçu un module qui permet de générer des formes urbaines typiques susceptibles de servir de référence à des analyses : il s'agit du générateur de trames urbaines synthétiques.

5.1. Trames urbaines typiques à générer

Formellement, nous rappelons qu'une trame urbaine est composée de deux types d'éléments : le semis des immeubles et le plan de la ville, avec notamment le plan des rues et des chemins permettant de relier les immeubles les uns aux autres. Si nous voulons fabriquer un générateur de trames urbaines, il devra nécessairement permettre de générer d'une part des plans de rues typiques, et d'autre part des répartitions, ou semis, d'immeubles caractéristiques à la surface d'une ville, de sorte à pouvoir autoriser la superposition ou interaction entre ces deux éléments.

5.1.1. Les plans archétypaux

Un certain nombre de types fondamentaux de plans de villes ont été proposés par les urbanistes au cours de l'histoire : ceux-ci ont constitué des modèles morphologiques pour la création ou le développement des villes. Nous en retenons quatre pour notre expérimentation.

Les plans orthogonaux ou hippodaméens. Le plan orthogonal, dit « de Manhattan » ou « en damier », « en échiquier » ou encore « hippodaméen », du nom d'Hippodamos de Milet, est un des plus anciens et des plus répandus plans de ville – on le trouve sous des formes diverses, soit en tant que plan colon, pour une création *ex-nihilo* de ville (bastides du Sud-Ouest par exemple, mais aussi villes du Nouveau Monde), soit en tant que forme symbolique (FengShui par exemple) reliant la ville à l'univers, orientée rigoureusement selon les directions cardinales dans le monde romain, mais aussi en Chine, au Japon, etc.

Les plans tortueux ou gothiques médiévaux. Il s'agit de plans caractérisés par leur tortuosité, l'absence de hiérarchie claire des voies, la présence de cours et de cul-de-sac nombreux, et une densité importante des voies, notamment au centre où les îlots sont plus petits. Caractéristiques de nos villes médiévales européennes, on les trouve aussi sous des formes similaires dans le monde arabe ou persan (kasbah).

Les plans radioconcentriques correspondent à des formes organisées idéales, imaginées pendant la Renaissance, et dont le modèle initiateur a été proposé par le Filarète, un architecte et sculpteur florentin du XV^e siècle. La ville idéale du Filarète (Sforzinda) est construite comme une étoile à 8 branches, avec 8 voies rayonnant à partir d'un lieu central et conduisant en ligne droite aux 8 portes de la ville. Ce modèle a été utilisé à partir de la Renaissance comme un idéal de ville, avec des réalisations concrètes

plus ou moins fidèles (Gruissan, Sun City en Arizona, Moscou dont l'organisation d'ensemble renvoie à un plan de ce type, etc.).

Les plans haussmanniens comme leur nom l'indique – dérivant du nom d'Eugène Haussmann, préfet de Seine qui a eu la charge d'agrandir Paris sous le Second Empire – sont caractéristiques des modèles d'urbanisme élaborés à partir du XIX^e siècle pour agrandir, rénover ou construire les villes. Ce type de plan est en fait un assemblage entre une base en damier et des éléments rayonnants disposés ici et là, autour de lieux que l'on veut démarquer (places importantes accueillant de grands monuments, gares, etc.). On obtient un plan disposant de plusieurs pôles rayonnants, sur une base en damier. Ce type de plan, initié à Paris, a connu un grand succès de par le monde, et beaucoup de quartiers si ce n'est des villes complètes s'en sont inspirés.

5.1.2. *Les semis d'immeubles caractéristiques*

Indépendamment des formes archétypales de plans évoquées ici dessus, nous devons également créer des formes référentielles de distributions ou de semis des immeubles. Les couvertures suivantes peuvent être envisagées : elles se basent toutes sur une localisation aléatoire sous contrainte des immeubles, afin de favoriser un type de couverture particulier.

La localisation aléatoire sous contrainte des immeubles consiste à les répartir aléatoirement dans un espace clos, et selon une distribution donnée. Les immeubles sont distribués aléatoirement mais on les contraint tout de même à couvrir d'une certaine façon l'espace de la ville. Cette contrainte vise à reproduire des distributions d'immeubles soit uniformes, soit centrées, soit mélangées, le tout dans un espace fini (délimité). On obtient les types suivants (voir aussi figure 6, *infra*).

Les couvertures aléatoires uniformes. Il s'agit d'une couverture d'immeubles qui tend à couvrir uniformément la ville. Cela correspond à une ville rationnelle, au plan par exemple hippodaméen, et où les immeubles se répartissent de façon équilibrée à travers la ville.

Les couvertures aléatoires centrées. Ce sont des distributions d'immeubles qui vont favoriser la localisation au centre par rapport à la périphérie, ou par rapport à l'étalement sur toute la surface. Il s'agit là sans doute du modèle d'organisation urbaine du bâti le plus fréquemment rencontré, et particulièrement adapté au plan médiéval, ou au plan radio-concentrique.

Les couvertures aléatoires à centralités multiples. Ce type de couverture reproduit une distribution des immeubles selon divers lieux centraux, ce qui correspond au modèle de la ville multi-polarisée ; les plans haussmanniens se prêtent bien à ce type d'organisation du bâti.

Enfin, les couvertures mixtes, mélangeant deux ou plusieurs des couvertures évoquées ci dessus, et dont la distribution des immeubles peut, par exemple,

correspondre au modèle d'une ville ayant évolué au cours de l'histoire et qui présenterait un semis d'immeubles formant une organisation urbaine composite, où se retrouverait localement les différentes références à chaque type de semis.

5.2. Construction du générateur de trames urbaines synthétiques

Le générateur de trames urbaines synthétiques doit permettre la génération de couches SIG, correspondant à différents critères paramétrables par l'utilisateur. Sa destination première est de générer les grands modèles archétypaux de trames urbaines, pouvant servir de référence dans l'évaluation des trames urbaines concrètes, observables dans la réalité. Il permet d'un côté de générer des plans de voiries typiques, et de l'autre de créer des semis d'immeubles caractéristiques, que l'on superposera pour les analyser.

5.2.1. Génération de plans de voiries typiques

Quatre types de réseaux urbains ont été implémentés dans le projet : 1) médiéval ; 2) hippodaméen ; 3) radioconcentrique ; 4) haussmannien (figure 3).

Pour la plupart des réseaux urbains, l'algorithme de génération est relativement simple. En effet, générer un damier (hippodaméen), ou un damier constellé d'étoiles rayonnantes disposées aléatoirement ici et là (haussmannien), ou encore des cercles concentriques reliés par des rayons ne pose pas de problème particulier du fait de la simplicité des géométries utilisées et de leur régularité.

– Pour le réseau hippodaméen, il suffit de générer un damier avec des lignes de même longueur, représentant les rues, disposées à égale distance les unes des autres et se croisant à angle droit. Puis on rattache chaque immeuble du semis à la rue la plus proche.

– Pour le réseau haussmannien, on part d'un damier hippodaméen, et on dispose sur certains nœuds choisis aléatoirement des étoiles dont le nombre de branches est

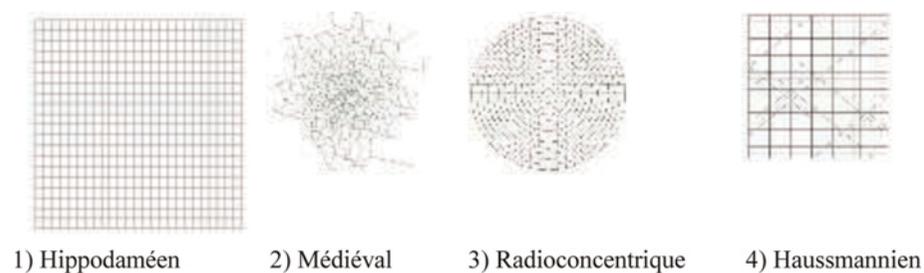


Figure 3. Tracés de rues archétypales générées par MoGUS

paramétrable. Ces étoiles sont les points de départ de voies transversales, qui sont elles-mêmes de longueurs aléatoires. Les immeubles sont rattachés aux rues les plus proches.

– Pour le réseau radioconcentrique, on place C cercles (de niveau $L \in \mathbb{N}$) avec une croissance de rayon constante pour figurer les rues circulaires. Pour chaque cercle, on place T rues transversales partant du cercle de niveau L et espacées entre elles selon un angle égale à $R/360$. Le nombre de rues T dépend du niveau du cercle courant : $T = f(L) = \text{nombre de rues au niveau } L$, ceci afin de compenser l'espacement mécanique des rues à mesure que les cercles s'agrandissent. La fonction f est paramétrable. On privilégie la rue circulaire ou transversale la plus proche pour rattacher l'immeuble.

Mais générer un réseau viaire médiéval, tortueux, apparemment inorganisé ou anarchique, demande un approfondissement.

5.2.2. Génération d'un réseau viaire médiéval

Pour le réseau viaire médiéval, nous avons cherché à générer un plan formé de rues tortueuses ; dessinant des îlots de tailles disparates et irrégulières ; avec des impasses ou cul-de-sac ; et dont la densité de rues au centre est plus grande qu'en périphérie. Pour cela nous avons imaginé l'algorithme suivant (figure 5), qui se base sur des nœuds placés aléatoirement dans l'espace, assignés itérativement, et reliés entre eux afin de former des arbres couvrants.

Dans un premier temps, on sépare l'espace en niveaux, eux-mêmes subdivisés en blocs. Chaque niveau représente une délimitation de l'espace à une certaine échelle, d'une surface moindre au niveau précédent, et contient un nombre égal de blocs ; chaque bloc est une subdivision de l'espace du niveau auquel il appartient et dont il constitue dès lors un sous-ensemble.

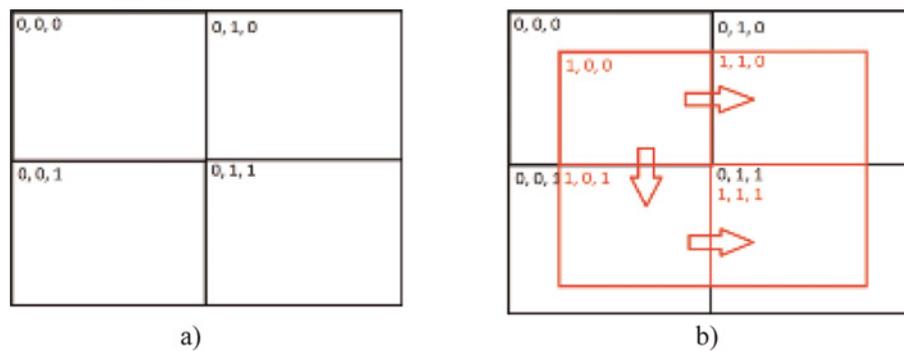


Figure 4. Génération d'un plan viaire médiéval : niveaux et blocs. a) niveau 0, 2X2 blocs. b) niveau 0 (en noir) et niveau 1 (en rouge), 2X2 blocs. Les flèches montrent le sens de numérotation : 000 = niveau 0 colonne 0 ligne 0 ; 001 = niveau 0 colonne 0 Ligne 1, etc.

```

Algorithme 1 : Génération de réseau médiéval

n : nombre de points pour la génération
nx : nombre de blocs horizontaux
ny : nombre de blocs verticaux
nsl : nombre de sous niveaux

Data : n, nx, ny, nsl
Result : model
Local : tmp_models (3D array)
Local : l, x, y, i, p
for l = 0 ; l < nsl ; l++
    for x = 0 ; x < nx ; x++
        for y = 0 ; y < ny ; y++
            tmp_models[l][x][y] = new GIS
for i = 0 ; i < n ; i++
    p = new random point in space
    for l = 0 ; l < nsl ; l++
        x, y = get_point_bloc(p, l)
        add_point(tmp_models[l][x][y], p)
for l = 0 ; l < nsl ; l++
    for x = 0 ; x < nx ; x++
        for y = 0 ; y < ny ; y++
            make_graph_connected(tmp_models[l][x][y])
            model += tmp_models[l][x][y]
for l = 0 ; l < nsl ; l++
    for x = 0 ; x < nx - 1 ; x++
        for y = 0 ; y < ny - 1 ; y++
            model += road_to_connect(tmp_models[l][x][y],
tmp_models[l][x+1][y])
            model += road_to_connect(tmp_models[l][x][y],
tmp_models[l][x][y+1])
    make_graph_connected(model)
return model

```

Figure 5. Algorithme de génération d'un plan viaire médiéval en C++

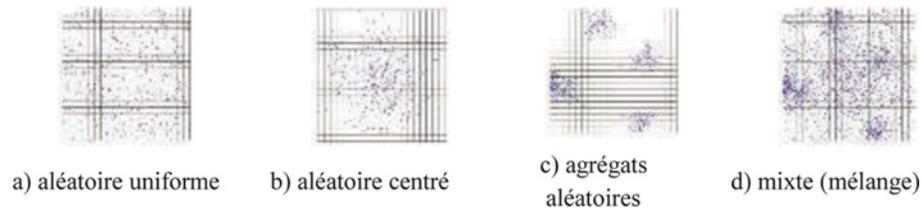


Figure 6. Types de semis d'immeubles générés par MoGUS (dans les images les semis sont présentés sur une grille pour mieux les visualiser)

Sur la figure 4, le niveau 0 (en noir) représente l'espace dans son ensemble, subdivisé en 4 blocs ; le niveau 1 (en rouge, subdivisé aussi en 4 blocs) est immédiatement inférieur et est moins étendu que le niveau 0. Le niveau 2 (non représenté) est composé lui aussi de 4 blocs est encore plus petit que le niveau 1, etc.

Les nœuds correspondant aux futures intersections sont affectés aléatoirement dans l'espace des niveaux et des blocs. Pour chaque bloc de chaque niveau, on relie les nœuds entre eux afin de former un arbre couvrant local. Les blocs sont ensuite reliés avec leurs voisins pour reconstituer l'organisation d'un niveau ; puis les niveaux sont eux-mêmes réassemblés entre eux pour recréer l'ensemble des voies pour toute la ville.

5.2.3. Génération d'un semis d'immeubles

Les semis d'immeubles représentent la répartition des bâtiments dans l'espace. Trois types de semis d'immeubles ont été identifiés et implémentés dans le projet MoGUS, afin de reproduire au mieux les couvertures spatiales d'immeubles identifiés : aléatoire uniforme ; aléatoire normal (qui suit une loi normale dans sa distribution spatiale, et crée donc une centralité) ; et en agrégats. À ces trois types, on en a rajouté un quatrième qui correspond à la fusion des trois précédents et qui représente une distribution d'immeubles dans une ville plus complexe (figure 6).

Le prototype MoGUS ainsi développé a été testé. Des tests de l'ensemble des options et paramètres du modèle montrent qu'il permet de générer les différents réseaux et semis urbains qui ont été programmés. Les morphologies urbaines ainsi générées peuvent être exportées sous forme de fichiers *shapefiles*, ce qui permet d'interfacer MoGUS avec la plupart des outils existants. Son fonctionnement est donc conforme aux attendus.

6. Application et discussion

L'outil MoGUS a été appliqué, en suivant un plan d'expérience, aux quatre trames urbaines fondamentales (hippodaméenne, haussmannienne, etc.) présentées ci-dessus et générés grâce au générateur, sur la base d'un semis d'immeubles caractéristique (ici l'aléatoire uniforme). L'idée est de voir quel est l'effet du type de plan urbain sur les

proximités entre immeubles, toutes choses restant égales par ailleurs (nombre d'immeubles et disposition des immeubles dans l'espace).

Précisons que *l'association d'un plan archétypal et d'un semis d'immeubles* caractéristique constitue ce que nous appellerons un « morphotype ». Une ville peut en effet être composée d'une infinité de trames différentes dans ses quartiers, organisées entre elles pour faire la trame d'ensemble de la ville. Cette dernière est donc nécessairement composite, mais elle comprend très probablement en son sein des morphotypes connus, à savoir des organisations d'immeubles et de voiries qui renvoient aux quatre plans viaires et aux quatre semis d'immeubles fondamentaux que nous décrivons ici.

6.1. Plan d'expérience

Le plan d'expérience réalisé a pour objectif de comparer les morphotypes générés par MoGUS, pour essayer de les classer du point de vue de l'économie des distances et de l'économie des voiries induite par chaque morphotype.

Plusieurs types d'analyses peuvent être effectués dans le cadre d'un plan d'expérience : dans les analyses OAT (*One At a Time*), chaque donnée est variée indépendamment des autres de façon à mesurer son impact sur le modèle, alors que les analyses *Monte-Carlo* font varier conjointement diverses données afin de tenir compte des possibles interactions entre celles-ci (Saltelli *et al.*, 2000).

Nous avons opté pour un plan d'expérience de type OAT afin d'explorer le modèle en ne faisant varier qu'un critère à la fois, pour bien mesurer l'incidence de ce critère. Ainsi, nous avons choisi de ne faire varier que le critère de densité de voirie pour chacun des morphotypes, les autres paramètres (surface de la ville, population représentée, répartition des immeubles) étant valorisés identiquement. Ceci nous permet de peser l'effet de chaque morphotype et de sa densité de voiries sur les distances d'immeuble à immeuble induites, soit l'objet de notre recherche.

Le plan d'expérience correspond dès lors à la simulation des quatre morphotypes évoqués (à savoir les quatre trames urbaines archétypales, associées à un semis d'immeubles uniforme), en ne faisant varier que la densité des voies. Ces trames sont rigoureusement basées sur le même type de ville : une ville occidentale moyenne de plaine de 10 000 immeubles, soit environ 50 000 habitants, dans un espace virtuel sans altitude de 4 km², soit 2 km de côté, avec une répartition des immeubles aléatoire uniforme. Nous avons donc une tache urbaine de taille comparable pour chaque morphotype, avec une densité d'habitants de l'ordre de 12 500 habitants/km², ce qui est tout à fait réaliste et correspond à la population moyenne d'une ville comme Bagnolet ou le Kremlin-Bicêtre, par exemple.

– Avec MoGUS, nous avons généré pour chaque trame archétypale (hippodaméen, médiéval, radioconcentrique et haussmannien) trois plans de ville à la densité de voirie respectivement : peu dense (lâche), moyennement dense (moyen), et enfin dense. Cette variation a été obtenue en changeant uniquement le nombre de rues, de cercles

concentriques et/ou d'étoiles rayonnantes de chaque trame – le nombre et la répartition des immeubles restant identiques – pour pouvoir comparer les performances des types de plans viaires entre eux, selon le critère de la densité de voirie. En appliquant ces critères, nous obtenons :

- 3 trames haussmanniennes, avec une densité de rue allant de 10 × 10 rues (soit une rue tous les 200 m) à 40 × 40 rues (soit une rue tous les 50 m), et un nombre de rayonnantes (étoiles) allant de 5 à 16 ;

- 3 trames hippodaméennes avec une densité de rue allant de 10 × 10 rues (soit une rue tous les 200 m) à 50 × 50 rues (soit une rue tous les 40 m) ;

- 3 trames radioconcentriques avec une densité de rue allant de 8 à 14 cercles, et un nombre de rues entre les cercles (pour le premier cercle) variant de 4 à 8 ;

- 3 trames médiévales avec une densité de rue allant de 8 à 32, soit du simple au quadruple.

Chacune de ces douze trames a été associée au même semis d'immeubles aléatoire uniforme, formant ainsi *douze morphotypes* pour lesquels nous avons effectué 10 simulations, ce qui fait un total de 120 simulations, soit 4 morphotypes × 3 densités × 10 simulations.

Ces morphotypes sont ensuite confrontés les uns aux autres d'une part en moyennant leurs indices sur les 10 simulations par morphotype pour avoir un avis global pour chaque type de plan ; et d'autre part en classant les douze configurations résultantes (4 morphotypes × 3 densités) moyennées sur 10 simulations, pour voir quelles configurations se distinguent. La mesure et les commentaires comparatifs ne porteront que sur l'impact des types de plans viaire, et de la densité de voirie, qui constitue notre variable d'entrée.

6.2. Résultats globaux et discussion

Nous présentons en tableau 1 les paramètres de départ et les résultats successifs des indices globaux α , β et γ , et IN et IE calculés pour un jeu de 10 simulations. Les résultats présentent les valeurs moyennes obtenues pour ces 10 simulations, et pour les quatre morphotypes sélectionnés, ceux-ci correspondant à un même semis d'immeuble aléatoire uniforme sur les quatre grands types de plans archétypaux de villes.

Pour l'analyse des résultats, nous nous plaçons dans la perspective du développement durable, et considérons qu'un morphotype éloignant les immeubles les uns des autres sera moins intéressant qu'un morphotype tendant à les rapprocher. De même, un morphotype nécessitant la construction d'un déployé de voiries plus important sera jugé moins efficient qu'un morphotype économe de ce point de vue. En conséquence, nous qualifierons les premiers morphotypes (plus de distances, plus de déployé de voirie) de « moins bons » que les seconds (moins de distances et moins de voiries), jugés « meilleurs ».

Tableau 1. Tableau comparatif des indices α , β et γ , et IN, IE et IS par morphotype

Indices globaux moyennés par couche	Hippodaméen	Médiéval	Radioconcentrique	Haussmannien
SIG				
Surface (ha)	400	400	400	400
Nimm	10 000	10 000	10 000	10 000
Nsr	2 053	3 738	3 160	1 823
Graphe urbain				
SLr	11 067	7 122	6 560	11 461
Graphe complet				
SDb2b	1 384 E + 10	1 580 E + 10	1 333 E + 10	1 218 E + 10
α	0,460	<i>0,189</i>	0,277	0,577
β	1,907	<i>1,376</i>	1,548	2,140
γ	0,640	<i>0,459</i>	0,518	0,719
IN	184,21	<i>224,34</i>	214,62	139,48
IE	557,46	<i>61,02</i>	117,14	287,23
IS	5,67	<i>8,33</i>	7,50	4,67

En gras : résultats pour une ville fortement vascularisée (α , β et γ) ; proche (IN) ; et parcimonieuse en rues (IE). En italique : résultats pour une ville faiblement vascularisée (α , β et γ) ; distante (IN) ; et dispendieuse en rues (IE).

Ceci précisé, en gras nous figurons les « meilleurs » résultats pour chaque indice, et en italique les « moins bons ». Par « meilleur » nous entendons précisément un morphotype mieux vascularisé, plus économe des distances et plus parcimonieux en termes de nombre de rues ; l'appréciation « moins bon » renvoie à la situation inverse, à savoir une faible vascularisation du morphotype, pour une ville présentant de grandes distances entre les immeubles et ce malgré un réseau de rues très dense.

6.2.1. Commentaires liminaires

Les trois premières lignes du tableau 1 présentent successivement les données implémentées au départ (nombre d'immeubles et taille de la tache urbaine) et quelques mesures issues du graphe urbain et du graphe complet, qui seront mises en œuvre dans les indicateurs IN et IE.

Au niveau du SIG, l'effet du type de plan sur le nombre de segments de routes générées (Nsr) se traduit par la production de bien plus de segments de rues pour le

radioconcentrique et le médiéval – le double en moyenne – que pour l’haussmannien ou l’hippodaméen. Toutefois, si on considère le cumul des longueurs de ces segments dans le graphe urbain (SLr), le classement s’inverse car c’est bien le haussmannien et l’hippodaméen qui construisent les déployés de rues les plus longs. On a donc deux morphotypes aux segments de rues nombreux mais courts (médiéval et radioconcentrique), s’opposant à deux autres morphotypes aux segments de rues moins nombreux mais bien plus longs (hippodaméen et haussmannien).

Si on observe l’impact de ces différences morphotypiques sur les distances d’immeuble à immeuble du graphe complet (SDb2b), c’est le médiéval qui a le plus mauvais score, générant en moyenne 30 % de déployé de distances d’immeuble à immeuble en plus par rapport à l’haussmannien. Le radioconcentrique et l’hippodaméen ont des scores intermédiaires, certes plus proches du haussmannien.

6.2.2. Résultats des indices α , β et γ

Concernant les indices de Kansky, on constate que les morphotypes haussmanniens présentent globalement une forte vascularisation (α) et une meilleure connectivité réelle et potentielle (β et γ) ; alors qu’à l’inverse les morphotypes médiévaux, truffés d’impasses et de carrefours à deux branches, ont les résultats les plus faibles à cet égard. L’hippodaméen viendrait en seconde position et le radioconcentrique en troisième, selon ces indices.

6.2.3. Résultats des indices IN et IE

Pour les indices IN et IE, il convient de définir en premier lieu un critère d’appréciation pour commenter les résultats. Si on se souvient que IN mesure en réalité le déployé des distances d’immeubles à immeubles selon la trame considérée, on peut adopter le vocabulaire suivant pour IN : un IN important correspond à une ville « distante », alors qu’un IN faible traduit une ville plus « proche ». À noter que « distante » ne signifie pas forcément « étalée », et que « proche » ne veut pas forcément dire « compacte » : dans une structure de ville fractale, les immeubles peuvent en effet être éloignés les uns des autres alors même que la ville reste globalement compacte.

Pour IE, on pondère IN par le nombre de segments de rues : donc si IE est élevé, c’est que le nombre de segments de rues qu’il a fallu construire est faible, d’où le qualificatif de « parcimonieux » ; à l’inverse, lorsque IE est faible, c’est que le nombre de segments de rues est élevé, d’où le qualificatif de « dispendieux ».

Les choses sont plus contrastées avec IN et IE. En effet, le haussmannien apparaît comme le morphotype générant le moins de distance entre les immeubles (respectivement : le plus pour le médiéval) toutes choses étant égales par ailleurs ; mais au prix d’un investissement en voirie initiale plus important que pour l’hippodaméen par exemple, puisque le nombre de rues y est plus élevé.

À l'inverse, le morphotype médiéval est celui générant le plus de distance entre immeubles, et ce même si l'investissement en voirie y est conséquent. On peut donc dire que le haussmannien est « fortement vascularisé », « proche » et moyennement « dispendieux », là où le médiéval est « faiblement vascularisé », « distant » et malgré tout « fort dispendieux ».

Le morphotype radioconcentrique apparaît comme peu intéressant ; à peine moins distant que le médiéval, il est certes moins dispendieux que ce dernier mais reste loin derrière le haussmannien et l'hippodaméen sur ce critère.

Enfin, l'hippodaméen est clairement le moins dispendieux, avec tout de même des valeurs de proximité et de vascularisation tout à fait intéressantes.

Ainsi, si on considère à présent conjointement les deux indices IN et IE, au travers de l'indicateur synthétique IS, le haussmannien serait le meilleur compromis en termes de vascularisation et de proximité, car il rapproche suffisamment les immeubles avec un investissement voirie qui n'est pas trop excessif. Le médiéval quant à lui serait indéniablement la pire solution, l'investissement voirie étant le plus important pour un résultat de proximité le plus faible.

6.3. Résultats détaillés et discussion

Pour les résultats détaillés, nous allons essentiellement regarder les morphotypes que l'on retrouve dans les quartiles extrêmes, pour chaque indice.

6.3.1. Résultats détaillés des indices α , β et γ

Les indices α , β et γ sont totalement convergents (tableau 2). Les morphotypes les plus fortement vascularisés sont indéniablement les haussmanniens, à tous égards qu'ils soient denses, moyennement denses ou lâches. Alors que les morphotypes médiévaux apparaissent toujours comme les plus pauvrement vascularisés, quelles que soient leurs densités. Tout se passe comme si ces trois indices étaient indépendants de la densité des immeubles, et n'étaient sensibles qu'à la forme d'organisation de la trame urbaine.

6.3.2. Résultats détaillés des indices IN et IE

Si on considère à présent les indices IE et IN (tableau 3, ordonné selon IN) la convergence de ces indices est différente de ce que nous venons de décrire pour les indices α , β et γ .

En effet, les indices IN et IE jouent quasi systématiquement à l'opposé l'un de l'autre, alors que α , β et γ étaient en phase : les trames qui se distinguent en IN sont toujours en retrait en IE, et inversement.

– Si on ne considère que IN, ce sont les tissus denses, haussmanniens et hippodaméens, qui constituent les meilleures options, concrétisant une ville « proche » (IN petit). À l'inverse, ce sont les tissus lâches, hippodaméens et radioconcentriques qui

Tableau 2. Tableau comparatif des indices α , β et γ pour des trames urbaines de densités variables associées à un semis d'immeubles aléatoire. En gras : résultats pour une ville fortement vascularisée (α , β et γ). En italique : résultats pour une ville faiblement vascularisée (α , β et γ)

Nom de la trame	Alpha	Beta	Gamma
<i>Médiéval 8 lâche</i>	<i>0,150</i>	<i>1,299</i>	<i>0,434</i>
<i>Médiéval 32 dense</i>	<i>0,191</i>	<i>1,380</i>	<i>0,461</i>
<i>Médiéval 16 moyen</i>	<i>0,225</i>	<i>1,449</i>	<i>0,484</i>
Radioconcentrique 14 dense	0,269	1,535	0,513
Radioconcentrique 10 moyen	0,277	1,549	0,519
Radioconcentrique 8 lâche	0,285	1,560	0,524
Hippodaméen 10 × 10 lâche	0,437	1,846	0,626
Hippodaméen 20 × 20 moyen	0,460	1,913	0,641
Hippodaméen 50 × 50 dense	0,482	1,962	0,655
Hausmannien 20 × 20 moyen	0,548	2,088	0,699
Hausmannien 10 × 10 lâche	0,584	2,136	0,724
Hausmannien 40 × 40 dense	0,600	2,197	0,733

ont les moins bons résultats, caractérisant une ville « distante » (IN grand). La ville médiévale à densité moyenne apparaît aussi comme étant plutôt distante.

– Mais si on considère IE, c'est pratiquement l'inverse. Les morphotypes haussmanniens et hippodaméens denses apparaissent comme très dispendieux en voiries urbaines, à l'instar du radioconcentrique dense (IE petit) ; alors que les morphotypes hippodaméens, radioconcentriques et haussmanniens lâches seraient de bien meilleures options (IE grand).

On constate dans cette comparaison IN, IE que la question de la densité des trames viaires apparaît comme centrale, et qu'elle est bien discriminée dans l'application de ces indices. De fait, la densité de voiries semble assez bien commander le caractère proche ou distant d'une ville si on considère IN. Il en va de même pour IE, mais ce n'est pas une surprise, le lien entre densité de rues et caractère dispendieux de la ville étant évident et trivial.

Tableau 3. Tableau comparatif des indices IN, IE pour des trames urbaines caractéristiques de densités variables, associées à un semis d'immeubles aléatoire uniforme. En gras : « meilleurs » résultats – pour une ville plus proche (IN), parcimonieuse en rues (IE). En italique : « moins bons » résultats – pour une ville plus distante (IN), dispendieuse en rues (IE)

Nom de la trame	IN	IE
Hausmannien 40 × 40 dense	60,24	<i>14,52</i>
Hippodaméen 50 × 50 dense	66,48	<i>13,04</i>
Hausmannien 20 × 20 moyen	127,98	127,73
Radioconcentrique 14 dense	153,22	25,43
Hippodaméen 20 × 20 moyen	164,04	195,29
Médiéval 16 Moyen	182,33	45,31
Radioconcentrique 10 moyen	216,93	95,77
Hausmannien 10 × 10 lâche	230,22	719,44
Médiéval 8 lâche	241,29	61,64
Médiéval 32 dense	<i>249,40</i>	76,12
Radioconcentrique 8 lâche	<i>273,71</i>	230,20
Hippodaméen 10 × 10 lâche	<i>322,09</i>	1464,06

6.3.3. Résultats détaillés de l'indicateur IS

Si on considère à présent IS, dans le tableau 4, ordonné selon IS, on observe que les trois « meilleurs » morphotypes – meilleur compromis entre un coût d'investissement de voirie modéré et une faible distance d'immeubles à immeubles – sont constitués par des trames haussmanniennes ou hippodaméennes de densités moyennes à lâche. À l'inverse, les quatre « moins bonnes » options sont toujours constituées par des morphotypes médiévaux ou radioconcentriques denses, ou lâches. Toutes les autres options donnent des résultats intermédiaires.

Notons ici que nous sommes en totale conformité avec ce qui avait été observé pour les indices α , β et γ ; les « meilleurs » morphotypes restant basés sur des trames haussmanniennes et hippodaméennes et les plus « mauvais » sur des bases médiévales et radioconcentriques. L'effet de la densité des voies est, selon cet indicateur IS, atténué et n'impacte finalement guère le classement des morphotypes.

Tableau 4. Tableau comparatif de l'indicateur synthétique IS pour des trames urbaines caractéristiques de densités variables, associées à un semis d'immeubles aléatoire uniforme. En gras : « meilleurs » résultats - pour une ville à la fois plus proche et parcimonieuse en rues, avec un meilleur compromis distance/nombre de rues (IS). En italique : « moins bons » résultats – pour une ville plus distante, dispendieuse en rues, et au moins bon compromis distance/nombre de rue (IS)

Nom de la trame	Rang IN	Rang IE	IS
Haussmannien 20 × 20 moyen	3	4	3,50
Hippodaméen 20 × 20 moyen	5	3	4,00
Haussmannien 10 × 10 lâche	8	2	5,00
Haussmannien 40 × 40 dense	1	<i>10</i>	5,50
Hippodaméen 50 × 50 dense	2	<i>11</i>	6,50
Radioconcentrique 10 moyen	7	6	6,50
Hippodaméen 10 × 10 lâche	<i>12</i>	1	6,50
Médiéval 16 moyen	6	9	7,50
<i>Radioconcentrique 14 dense</i>	4	<i>12</i>	<i>8,00</i>
<i>Radioconcentrique 8 lâche</i>	<i>11</i>	5	<i>8,00</i>
<i>Médiéval 8 lâche</i>	9	8	<i>8,50</i>
<i>Médiéval 32 dense</i>	<i>10</i>	7	<i>8,50</i>

Le morphotype commande ainsi davantage les proximités que la densité des voies pour des organisations reposant sur une maille carrée. Ceci se confirme lorsqu'on observe les morphotypes reposant sur une configuration tortueuse ou radioconcentrique : on est surpris de constater que des densités de voies très éloignées (lâche ou dense) mènent rigoureusement au même résultat.

On en déduit que, pour un semis d'immeubles aléatoire uniforme, il faut plutôt privilégier des plans haussmanniens ou hippodaméens, à densité de voirie moyenne, voire lâche, si on veut une ville bien vascularisée, plus « proche » et dans une économie de voiries raisonnable. À l'opposé, et toujours si on cherche un bon compromis distance /coût d'équipement, les plans radioconcentriques et médiévaux sont à éviter pour ce type de semis d'immeuble, quelle que soit la densité de voirie.

Paradoxalement, on constate aussi que la densité des voies est finalement moins discriminante que le type de plan, les morphotypes denses n'étant pas les meilleurs choix. Ce résultat, semblant valoriser une ville à la trame de rues de densité moyenne ou

lâche par opposition à une ville à la trame de rues dense, peut paraître contradictoire avec une littérature qui valorise la densité pour des raisons écologiques en grande partie. Nous ne pensons pas qu'il faille aller aussi loin dans l'interprétation. En effet, le semis d'immeuble testé était de type aléatoire uniforme, or rares sont les villes où ce type de semis se rencontre. Il est ainsi possible qu'avec un semis de type aléatoire centré, l'ordre des trames urbaines « performantes » ne soit plus le même, et que le plan radioconcentrique puisse apparaître plus pertinent du point de vue de l'organisation urbaine. Pour le savoir il faudrait tester MoGUS avec un autre jeu de paramètres : cette opération est en projet.

7. Conclusion

L'objectif de cet article est de définir la trame urbaine, et de présenter un outil d'appréhension de celle-ci : l'outil MoGUS, dont nous avons évoqué la logique de construction et montré qu'il permettait une analyse comparative des propriétés des trames urbaines, celles-ci étant formées conjointement des semis d'immeubles de la ville inter-reliés entre eux par le réseau viaire.

Au passage nous avons également pu proposer le concept de « morphotype », pour désigner une trame urbaine de référence, qui se caractérise par l'association d'un modèle précis de plan de rues (plan archétypal) et d'un modèle type de répartition des immeubles dans un espace.

La génération de trames urbaines morphotypiques est possible avec cet outil, avec une bonne maîtrise de certains paramètres décrivant ces organisations : type d'organisation urbaine des rues, nombre et espacement des rues, surface de l'aire urbaine, nombre d'immeubles et répartition spatiale de ces immeubles.

L'originalité de l'outil est de permettre des mesures comparatives en prenant en compte conjointement le tracé des rues et la disposition des immeubles. Le calcul du total des distances d'immeubles à immeubles, en suivant les cheminements viaires, est une des spécificités du modèle MoGUS. Cela permet de caractériser chaque trame à partir d'une représentation réaliste de l'ensemble des distances d'immeubles à immeubles en tenant compte des particularités des réseaux viaires.

La modélisation de MoGUS et les mesures associées qui y sont développées, permettent à terme la comparaison de ces trames entre elles, à l'aide d'indices implémentés dans l'outil ou calculables *a posteriori*. Les indices α , β et γ de Kansky ont été directement programmés dans l'outil et testés, ainsi que trois autres indices calculés *a posteriori* et permettant d'apprécier le caractère vascularisé ou non, et déployé ou non, des trames urbaines.

Globalement tous ces indices fonctionnent et nous livrent une image contrastée en termes de résultats. Ainsi les indices α , β et γ semblent ne pas dépendre de la densité des rues, qui était notre variable d'entrée, mais uniquement du morphotype considéré. Alors que les autres indices, caractérisant plutôt le critère distanciel, vont être nettement influencés par la variation de densité de rues.

Les développements rendus possibles, et attendus par cet outil sont divers. Dans un premier temps, et du point de vue thématique, il serait intéressant d'appliquer l'outil à d'autres types de semis d'immeubles que celui testé, mais aussi et surtout à des villes réelles. D'un point de vue méthodologique, une autre ouverture consisterait à valuer chaque immeuble avec une donnée démographique (nombre de ménages ou de personnes par immeuble) et de réaliser des calculs de proximité non plus seulement entre immeubles, mais aussi entre ménages voire entre individus, car en définitive, ce sont les individus qui se déplacent d'immeuble à immeuble. Cela fait partie des développements ultérieurs attendus de MoGUS.

Bibliographie

- Abarca-Alvarez F., Campos-Sánchez F., Osuna-Pérez F. (2019). "Urban shape and built density metrics through the analysis of European urban fabrics using artificial intelligence", *Sustainability*, vol. 11, p. 6622.
- Albert R., Barabasi A.-L. (2002). "Statistical mechanics of complex networks", *Review of Modern Physics*, vol. 74, p. 47-97.
- Alexander Ch. (1965). "A City is Not a Tree", *Architectural Forum*, vol. 122, n° 1, p. 58-61; vol. 122, n° 2, p. 58-62. URL: <http://www.bp.ntu.edu.tw/wp-content/uploads/2011/12/06-Alexander-A-city-is-not-a-tree.pdf>
- Amar G. (1993). « Pour une écologie urbaine des transports », *Annales de la Recherche Urbaine/Mobilités*, n° 67, juin-sept, p. 141-151.
- Badariotti D., Banos A., Moreno D. (2007). « Conception d'un automate cellulaire non stationnaire à base de graphe pour modéliser la structure spatiale urbaine : le modèle Remus », *Cybergéo : European Journal of Geography* [En ligne], article n° 403, 03 octobre 2007. URL : <http://journals.openedition.org/cybergeo/10993>
- Badariotti D., Banos A., Moreno D. (2009). « Morphologie urbaine et réseau. Etude des discontinuités et des ruptures induites par le réseau de circulation à l'aide du modèle Remus », *Revue internationale de géomatique*, vol. 19, n° 1/2009, p. 45-66.
- Badariotti D., Tran D.B., Piombini A., Conesa A. (2017). « La morpho-mobilité - un nouveau concept traduisant les liens entre morphologie et mobilité appliquée à l'urbanisme », *Villes à vivre. Le quotidien métropolitain entre ancrage et mobilité*, Negron-Poblete P., Paulhiac-Scherrer F. (coord.), Presses universitaires de l'Université de Montréal, Montréal, p. 133-154.
- Batty M. (2013). *The New Science of Cities*, MIT Press, Cambridge.
- Beauguitte L. (2020). « Indices Kansky », *Hypergéométrie*, 4 p.
- Berghauser-Pont I., Haupt P. (2007). « The Spacemate: density and the typomorphology of the urban fabric », ed. FD van Hoesen, HJ Rosemann. *Urbanism Laboratory for Cities and Regions: Progress of Research Issues in Urbanism*, Delft, p. 11-16.
- Boffet A., Serra S.R. (2001). « Identification of spatial structures within urban blocks for town characterization », *20th International Cartographic Conference*. Beijing.

- Brès A. (1998). « Le système des voies urbaines : entre réseau et espace », *Flux*, n° 34, p. 4-20.
- Conzen M., Robert G. (1960). « Alnwick, Northumberland: A study in town-plan analysis », *Institute of British Geographer*, Publication 27 (George Philip) London.
- Ducruet C. (2010). « Les mesures globales d'un réseau »: Version 1 - Novembre 2010. HAL Id: halshs-00541902. URL : <https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-00541902>
- Ducruet C., Lugo I. (2013). "Structure and dynamics of transportation networks: Models, methods and applications", *The SAGE Handbook of Transport Studies*, Rodrigue J.P., Notteboom T.E., Shaw J., SAGE, p. 347-364.
- Dupuy G. (1991). *L'urbanisme des réseaux, théories et méthodes*. Paris, Armand Colin.
- Frankhauser P., Thomas I., Badariotti D. (2010). « Comparing the fractality of European urban neighborhoods: do national contexts matter? ». *Journal of Geographical Systems*, doi: 10.1007/s10109-010-0142-4.
- Fusco G.(2018). *Ville complexité et incertitude*, Vol 2 d'HDR, Université de Nice.
- Gleyze J.F. (2001). *Réseaux, territoires et accessibilité*, IGN, Gogit.
- Hachi R. (2020). *Explorer l'effet de la morphologie des réseaux viaires sur leurs conditions d'accessibilité. Une approche empirique fondée sur la théorie des graphes*, Thèse, Université de Paris 1.
- Haggett P., Chorley R.J. (1969). *Network Analysis in Geography*, vol. 67, Edward Arnold London.
- Hamaina R., Leduc T., Moreau G. (2012a). « Caractérisation des tissus urbains à partir de l'analyse structurelle des réseaux viaires », *Cybergeo: European Journal of Geography*, document 581, cybergeo. 25009.
- Hamaina R., Leduc T., Moreau G. (2012b). "Towards urban fabrics characterization based on buildings footprints", *Bridging the Geographic Information Sciences, Lecture Notes in Geoinformation and Cartography (LNG&C)*, Gensel J., Josselin D., and Vandenbroucke D. editors, Springer Berlin Heidelberg, p. 327-346.
- Hillier B., Penn A., Hanson J., Grajewski T., Xu J. (1993). "Natural movement-or, configuration and attraction in urban pedestrian movement", *Environment and Planning B: Planning and Design*, vol. 20, n° 1, p. 29-66.
- Kansky H. (1963). *Structure of Transportation Networks*, University of Chicago.
- Kansky K., Dancoisne P. (1989). "Measures of network structure", *Flux*, n° spécial, p. 89-121.
- Lagesse C., Bonnin Ph., Bordin P., Douady S. (2016). « Méthodologie d'application et de caractérisation des réseaux spatiaux. Application au système viaire de Paris », *Flux*, n° 105, p. 33-49.
- Laterrasse J. (2018). « Urbanisme et trame urbaine : ce que nous apprend l'histoire », dossier thématique : ville et technique, *ephaistos revue d'histoire des techniques*, vol. 1, p. 2016-2018.
- Levy A. (2005). « Formes urbaines et significations : revisiter la morphologie urbaine », *Espace et Sociétés*, n° 122, p. 25-48.
- McGarigal K., Marks B. (1995). *FRAGSTATS: Spatial Pattern Analysis Program for Categorical Maps*, <http://www.umass.edu/landeco/research/fragstats/fragstats.html>

- Malfroy S., Caniggia G. (1986). *L'approche morphologique de la ville et du territoire*. Zurich: Eidgenossische Technische Hochschule, Lehrstuhl für Städtebaugesichte.
- Meyer C. (2019). *Projets MoGUS et REMUS - Model Generator & analyzer for Urban Simulation REticular Model for Urban Simulation*, Rapport d'apprentissage 2018/2019, Laboratoire LIVE / UFR Mathématique et informatique de l'Unistra.
- Moreno D., Badariotti D., Banos A. (2009). "Integrating morphology in urban simulation through reticular automata modelling", *Handbook of Theoretical and Quantitative Geography*, Bavaud F., Mager C., Université de Lausanne, p. 261-310.
- Porta S., Crucitti P., Latora V. (2006). "The network analysis of urban streets: a primal approach", *Environment and Planning B: Planning and Design*, Pion Ltd, London, vol. 33, p. 705-725.
- Racine J. B., Reymond H. (1973). *L'analyse quantitative en géographie*, Paris, PUF.
- Saint-Julien Th. (1981). « Croissance industrielle et trame urbaine (*Industrial growth and urban framework*) », *Bulletin de l'Association de Géographes Français*, n° 475-476, p. 59-66.
- Saltelli A., Chan K., Scott M. (2000). *Sensitivity Analysis*. Wiley, New York.
- Strano E., Viana M., Da Fontoura Costa L., Cardillo A., Porta S., Latora V. (2013). "Urban street networks, a comparative analysis of ten European cities", *Environment and Planning B: Planning and Design*, Pion Ltd, London, vol. 40, n° 6, p. 1071-1086.
- Tirico M., (2020). *Morphogenesis of Complex Networks*. Thèse, Université du Havre.
- Tran T.D.B., Piombini A., Ignatowicz M., Moreno D., Frigui R., Richer C., Aguilera A., Badariotti D. (2014). « Relations entre morphologie urbaine et mobilité dans la Communauté Urbaine de Strasbourg (CUS). Apports des indices morphologiques et de l'Enquête Ménages Déplacements », *Cybergéo*, doc 702, DOI10.4000/Cybergeo.2665.
- Vaughan R. (1987). *Urban Spatial Traffic Patterns*, London, Pion Limited.
- Venerandi A., Zanella M., Romice O., Dibble J., Porta S. (2017). "Form and urban change: an urban morphometric study of five gentrified neighbourhoods in London", *Environment and Planning B: Planning and Design*, vol. 44, p. 1056-1076.
- Vernez-Moudon A. (1997). "Urban morphology as an emerging interdisciplinary field", *Urban Morphology*, n° 1, p. 3-10.
- Werner C. (1971). "Network analysis in geography", *Journal of Regional Science*, vol. 11, p. 127-129.

Reçu le : 1^e mars 2021
 Accepté le : 8 octobre 2021