
Développement urbain fractal sous contraintes d'accessibilités

Modèles et outils d'aide à la décision pour l'aménagement urbain

Projet de recherche dirigé par : Pierre Frankhauser et Cécile Tannier

Participants : Hélène Houot et Gilles Vuidel

ThéMA UMR 6049 CNRS-Université de Franche-Comté et de Bourgogne
32 rue Mégevand F-25 030 Besançon Cedex
Tel : +33 (0)3 81 66 54 21/54 81
<http://thema.univ-fcomte.fr>

Collaborateurs : Tristan Gruson*, Paul Rabut*, Yunyi Wang*, Vincent Paillot#

* étudiants en master 2 IT-ISA, Université de Franche-Comté

étudiant à l'école d'architecture de Strasbourg

Novembre 2010

Recherche financée par le MEEDDM - CGDD/DRI

Contact : Gérard Brun
Tour Voltaire - F-92055 La Défense Cedex
Tel : 01 40 81 64 18
E-mail : Gerard.Brun@developpement-durable.gouv.fr
Site internet : www.predit.prd.fr

Préambule

Ce projet fait suite à une recherche financée par le PREDIT intitulée « *Vers des déplacements périurbains plus durables – Proposition de modèles fractals opérationnels d'urbanisation* » (Dir. P. Frankhauser – Participants : H. Houot, C. Tannier et G. Vuidel)¹. Ce premier projet, réalisé entre juillet 2005 et juin 2007, a posé les bases du présent projet, à savoir la définition de ses fondements conceptuels et de ses principes méthodologiques. Le présent projet a pour but de compléter la méthodologie décrite dans le premier projet et de l'opérationnaliser à travers le développement d'un outil d'aide à la décision pour l'aménagement. Le cœur du travail réalisé consiste donc en la recherche et le test de solutions pratiques pour la mise en œuvre des idées émises dans le premier projet.

Le concept d'aménagement appliqué dans le cadre du projet part du principe :

- qu'il est possible de mettre en place une stratégie de développement qui intègre les souhaits des résidents tout en réduisant les effets néfastes de l'étalement urbain ;
- que les dysfonctionnements observés actuellement sont essentiellement le résultat de l'absence d'une stratégie de localisation cohérente à l'échelle des agglomérations. Les stratégies compétitives et divergentes des différents acteurs locaux et l'absence de coordination entre eux ont contribué à un étalement urbain diffus qui souffre souvent d'un manque d'offre de commerces et de services suffisant sur place ;
- qu'un élément crucial à développer pour limiter certains effets négatifs de l'étalement urbain est une réflexion conceptuelle sur la localisation et sur l'accessibilité des différentes aménités fréquentées par les résidents.

La localisation des développements résidentiels futurs doit prendre en compte les pratiques spatiales des usagers. Ce faisant, il sera possible de minimiser le nombre et la longueur déplacements en voiture particulière, tout en assurant une bonne accessibilité à des aménités de nature variée. Cet objectif conduit à des réflexions sur la localisation des services et commerces, mais aussi à la disposition des zones bâties par rapport aux espaces non bâties. En outre, les futures extensions résidentielles doivent limiter la consommation d'espace tout en satisfaisant à la demande en logements en termes quantitatifs et qualitatifs. Cet objectif vise à éviter le morcellement du bâti, mais aussi celui des espaces non-bâties. Enfin, la localisation des futurs développements résidentiels doit préserver une diversité du paysage naturel et urbain.

Nous avons développé un prototype d'outil d'aide à la décision pour l'aménagement urbain, intitulé MUP-City, visant à limiter certains effets négatifs de l'étalement urbain, notamment le nombre et longueur des déplacements en automobile. Sur la base d'une modélisation fractale multi-échelle, MUP-City permet de créer des scénarios de développement résidentiel en zone périurbaine. Des règles additionnelles d'accessibilité aux commerces et services, aux espaces ouverts, et de proximité au réseau routier existant permettent de moduler les formes d'urbanisation simulées.

¹ <http://portail.documentation.developpement-durable.gouv.fr/dri/document.xsp?id=Drast-OUV00002507>

Sommaire

Contexte : modèles de villes et systèmes d'aide à l'aménagement urbain	page 7
Objectifs du projet	page 11
PREMIÈRE PARTIE : présentation de MUP-City page 17	
MUP-City : description méthodologique	page 19
Déroulé d'une simulation avec MUP-City	page 27
Méthodes complémentaires pour analyser la morphologie des réseaux	page 30
Utilisation interactive de MUP-City pour l'aménagement urbain	page 34
DEUXIÈME PARTIE : applications de MUP-City page 39	
64 scénarios théoriques pour évaluer la stabilité et la robustesse du modèle	page 43
16 scénarios théoriques pour comparer les performances respectives de scénarios d'urbanisation multi- et mono-échelles	page 45
5 scénarios réalistes pour tester l'utilité de MUP-City pour l'aménagement urbain	page 52
20 scénarios réalistes visant à améliorer l'accessibilité aux commerces et services	page 56
Étude expérimentale pour l'élaboration des PLU des quatre communes riveraines de la future gare TGV de Besançon-Auxon	page 62
Récapitulatif des réalisations	page 67
Conclusion – Perspectives page 77	
Références bibliographiques	page 81

Contexte : modèles de villes et systèmes d'aide à l'aménagement urbain

La maîtrise de l'étalement urbain est au cœur des préoccupations en matière d'aménagement urbain. Ce processus traduit une demande sociale claire, à savoir l'accès à la propriété en maison individuelle dans un environnement résidentiel calme et vert. S'il permet de répondre à une telle demande et de maintenir la démographie et les équipements dans une partie de l'espace rural, les impacts négatifs de l'étalement urbain ne sont cependant plus à démontrer. Ils sont d'une part environnementaux : consommation énergétique, pollution atmosphérique, nuisances sonores, mise en péril de la biodiversité et des espaces naturels... [Alberti, 2005; Johnson, 2001], mais également socio-économiques : hausse des coûts fonciers dans les premières franges périurbaines, réduction de l'activité agricole, hausse des coûts de déplacement [Brueckner, 2000; Evans, 1991; Hall, 1997]. En arrière-plan, la question de la consommation d'espace est un enjeu majeur, sachant que la surface réellement consommée par la construction d'habitats reste souvent modeste par rapport à la surface consommée par de nouvelles infrastructures routières : 25% de la surface urbanisée en Europe et 30% aux Etats-Unis (40% à Los Angeles) [Camagni et al., 2002]. Sans parler des réseaux souterrains, d'électricité, d'alimentation en eau et d'assainissement, qui génèrent des frais d'investissement et de gestion importants. De ceci découle une question centrale pour l'aménagement urbain : où ouvrir de nouveaux espaces à l'urbanisation de manière à réduire les effets néfastes de l'étalement urbain ?

D'un point de vue théorique et conceptuel, les réponses à apporter font l'objet d'un débat ancien et récurrent. La densification et l'urbanisation des espaces libres internes au tissu bâti sont des leviers souvent préconisés. En lien avec les démarches de densification, le modèle de la ville compacte est le plus souvent mis en avant : il est favorable à l'utilisation des transports publics, permet une bonne accessibilité aux commerces et services, et réduit la ségrégation sociale, voir par exemple [Dantzig & Saaty, 1973; Newman & Kenworthy, 1989]. Mais les limites d'un tel modèle ont également été démontrées, notamment la congestion des axes routiers, la réduction de l'accès aux espaces verts et naturels, la hausse des prix des logements, la réduction de l'espace de vie [Banister, 1992; Breheny, 1997; Burton, 2000; Ewing, 1997; Owens, 1992]. On peut ainsi observer la promotion croissante d'un autre modèle urbain combinant une densification mesurée, au sens de "wisely compact city" [Camagni et al., 2002], et une organisation urbaine polycentrique [Davoudi, 2003]. A une échelle davantage locale, le modèle du *New Urbanism* se développe également, surtout aux Etats-unis. *New Urbanism is often implemented through traditional neighbourhood developments, which include high building densities, mixed uses, grid street patterns, narrow streets, and short setbacks* [Calthorpe, 1993; Conway, 2009; Katz, 1994].

Malgré les efforts déployés par les scientifiques et les aménageurs, la quête du modèle urbain optimal (en terme de durabilité) est cependant loin d'être arrivée à son terme. Concernant plus particulièrement la problématique de la mobilité et des déplacements, la relation entre forme urbaine et comportement de mobilité n'est pas encore clairement établie. D'une part, les recherches tentant de mettre en relation les formes urbaines compactes et les comportements de mobilité ne sont pas concluantes ; leurs résultats diffèrent selon la méthodologie adoptée, les données utilisées et le contexte spatio-temporel considéré [Cervero & Murakami, 2010; Geurs & van Wee, 2006]. D'autre part, les analyses des impacts du *New Urbanism* sur les comportements de mobilité ont aussi abouti à des conclusions mitigées : certaines études ont conclu à un moindre usage et une moindre possession de l'automobile et d'autres pas [Conway, 2009]. Enfin, les travaux qui se sont attachés à mettre en relation le polycentrisme plus ou moins affirmé de certains espaces urbains et l'organisation des flux et des déplacements dans ces espaces n'ont pas permis de déduire de règles générales pour l'aménagement des espaces urbains [Aguilera, 2005; Schwanen et al., 2003]. Pour s'affranchir des limites des études de cas, certains chercheurs ont développé des modèles de simulation

servant à prédire l'impact futur de différentes formes d'urbanisation sur les mobilités. Ces travaux n'ont pas permis de déterminer la supériorité d'un modèle d'urbanisation sur un autre. En revanche, ils ont confirmé l'influence des formes d'organisation spatiales sur les comportements de mobilité (en particulier [Geurs & van Wee, 2006]).

Modèles de villes fractals

Des travaux pionniers ont posé l'hypothèse de la fractalité des villes [Batty & Longley, 1986; Fotheringham et al., 1989; Frankhauser, 1988; Mandelbrot, 1982; White & Engelen, 1993]. Une série de publications a montré que la croissance urbaine génère une organisation spatiale fractale [Batty & Xie, 1996 et 1999; Benguigui et al., 2000; Shen, 2002; Thomas et al., 2008a]. Certaines contributions ont exploré l'aspect fractal des relations périmètre-surface, et la fractalité des bordures urbanisées [Arlinghaus & Nystuen, 1990; Frankhauser, 1994; Longley & Batty, 1989]. D'autres ont questionné la relation scalante entre le nombre d'agrégats bâtis et leur taille [Benguigui et al., 2006; Benguigui & Czamanski, 2004; De Keersmaecker et al., 2003; White & Engelen, 1993]. Depuis lors, de nombreuses publications ont contribué à asseoir l'hypothèse de la fractalité des villes via leur mesure, par exemple [Batty & Longley, 1994; Batty & Xie, 1996; Benguigui et al., 2000; Longley & Mesev, 2000; Shen, 2002; Tannier & Pumain, 2005; Thomas et al., 2007; Thomas et al., 2008a]. D'autres recherches encore ont utilisé les fractales pour simuler la croissance urbaine, ou la génération de tissus urbains, notamment [Benguigui & Czamanski, 2004] et [Batty, 2005].

Le modèle de la ville fractale pour l'aménagement urbain demeure toutefois peu étudié, et encore moins appliqué, en Europe et dans le reste du monde. Stamps [2002] a mis à l'épreuve l'hypothèse selon laquelle la silhouette d'une ville était mieux dessinée si la dimension fractale du dessin de la silhouette correspondait à la dimension fractale du paysage environnant. Niang & Soboyejo [2006] ont appliqué la géométrie fractale pour le design de quartiers résidentiels peu coûteux. Thomas et al. [2008b] ont mis en évidence une relation statistique positive entre la satisfaction résidentielle et la dimension fractale de l'environnement résidentiel bâti, dans le cadre d'une analyse empirique régionale des communes de Wallonie (Belgique). D'autres travaux ont comparé l'accessibilité à différents types d'aménités urbaines et rurales dans des tissus urbains théoriques fractals, le téragone et le tapis de Sierpinski, et non fractals, la ville quadratique. Frankhauser [2000] a montré que le téragone offre une meilleure accessibilité à la bordure urbaine que la ville carrée tout en offrant une accessibilité quasi-équivalente au centre principal, et sans consommer plus d'espace pour autant. Cavailhès et al., [2004], Frankhauser et Genre-Grandpierre [1998] et Frankhauser [2004] ont montré qu'en terme de distance aux aménités urbaines et rurales, une ville de la forme d'un tapis de Sierpinski est plus intéressante qu'une ville de forme compacte pour les individus fréquentant souvent des centres de petite et moyenne taille et moins souvent le centre urbain principal, et souhaitant vivre à proximité d'espaces ouverts.

Outils d'aide à la décision pour l'aménagement urbain (Spatial decision support systems, Planning support systems)

Sur le plan opératoire, les pistes explorées pour déterminer où ouvrir de nouveaux espaces à l'urbanisation sont nombreuses. Certains outils d'aide à la décision, en partie issus des théories économiques, permettent l'identification des sites potentiellement urbanisables à partir de fonctions d'évaluation (*suitability functions*) et/ou de fonctions d'utilité [Arentze et al., 2006; Klosterman, 1999; Li & Liu, 2008; Malczewski, 2004]. Différentes techniques permettent ensuite de choisir les sites appropriés : techniques d'analyse multicritères [Jankowski, 1995; Malczewski, 1999] ou d'optimisation multi-objectifs [Janssen et al., 2008; Ligmann-Zielinska et al., 2008], ou encore algorithmes d'affectation sous contraintes (*land-use allocation models*) [Cromley & Hanink, 1999; Klosterman, 1999]. Les modèles issus de l'intelligence artificielle ont

également ouvert la voie à des approches alternatives. Tel est le cas des modèles d'automates cellulaires, qui permettent de proposer des scénarios de développement urbain et d'explorer ainsi des futurs possibles, ou encore de tester l'effet de variables sensibles [Antoni, 2006; Li & Liu, 2008; White et al., 1997]. Les systèmes multi-agents permettent aussi de générer des schémas d'urbanisation dans une optique de planification urbaine [Ma et al., 2006; Saarlos et al., 2005].

Cependant, quelles que soient les applications, la forme urbaine n'est jamais au cœur de la construction du modèle. Certes, certains modèles déclinent les objectifs d'aménagement de manière spatiale (*spatial objectives*), sous la forme d'un degré de compacité, d'une taille ou d'un nombre d'agrégats bâtis, ou encore de densité de logements par hectare [Aerts et al., 2005; Janssen et al., 2008; Li & Liu, 2008; Ligmann-Zielinska et al., 2008; Stewart et al., 2004]. Ainsi, le modèle de la ville compacte peut être implicitement traduit par des règles de densification ou de compacité. Cependant, les différents systèmes d'aide à la planification ou à l'aménagement n'ont pas pour vocation la génération d'une forme urbaine bien définie, qu'elle soit compacte, polycentrique ou fractale. La modification d'une règle ou d'un objectif spatial peut donc aboutir à un changement profond de la forme urbaine générée.

Par ailleurs, le processus d'étalement urbain et les formes qui en découlent impliquent une multitude d'échelles qui sont rarement prises en compte de manière simultanée dans les systèmes existants : depuis la parcelle et son environnement proche, qui préoccupent le résident venant s'implanter en zone périurbaine en recherchant le calme et la verdure, jusqu'à la tâche urbaine dans son ensemble, dont la forme conditionne la ventilation de l'agglomération ou encore l'accessibilité à certaines aménités. C'est pourquoi, un des défis en modélisation urbaine est de mieux prendre en compte les caractéristiques multi-échelles des systèmes d'occupation du sol [Verburg et al., 2004]. Ce défi a notamment été relevé par [White, 2006], à travers le développement d'un modèle d'automate cellulaire multi-échelle.

Objectifs du projet

L'hypothèse de base est que l'accessibilité aux lieux fréquentés par les résidents est un facteur clé pour réduire le nombre et la longueur des déplacements, notamment en voiture, et donc les effets néfastes qui les accompagnent. Il est évident qu'une telle réduction n'est possible qu'en considérant la localisation des aménités recherchées par les résidents. En effet, localisation et accessibilité sont directement liées et sont des propriétés intrinsèques de la configuration spatiale d'un territoire. Les réflexions sur l'accessibilité doivent prendre en compte la fréquence de recours aux diverses aménités et donc les pratiques spatiales des usagers. En effet, on peut globalement accepter une distance plus longue, donc une moins bonne accessibilité, pour des aménités qui sont rarement fréquentées. En revanche, des lieux fréquentés quotidiennement devraient bénéficier d'une bonne accessibilité. Cet argument renvoie directement à différentes échelles spatiales et donc à un concept multi-échelle tel qu'on le trouve déjà dans la théorie des lieux centraux. Toutefois, la configuration spatiale proposée par Christaller présente plusieurs limites :

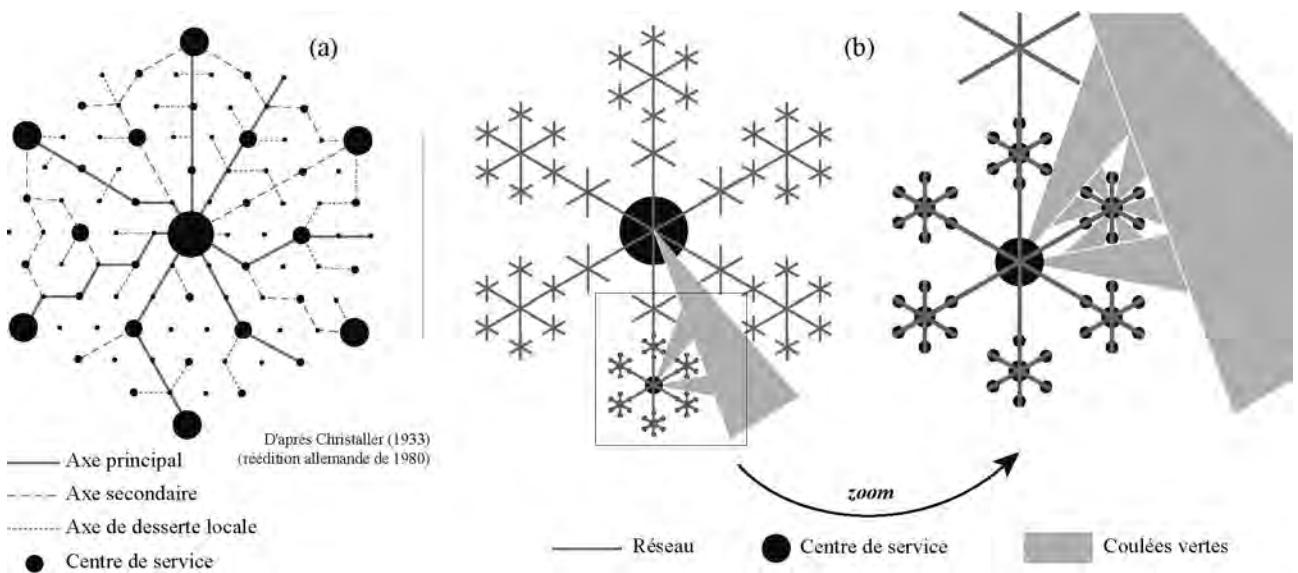
- Le semis des habitats est homogène et pose ainsi exactement le problème de l'étalement urbain actuel qui tend à rendre plus uniforme la répartition de la surface bâtie à l'échelle des agglomérations.
- Les seules aménités considérées sont les offres de service et de commerces. Or le choix de vivre dans les zones périurbaines est aussi l'expression du souhait de bénéficier d'une proximité au paysage ouvert.

Ceci nous a incité à proposer un concept d'aménagement inspiré par la géométrie fractale dont nous supposons qu'il répond de façon intrinsèque à un principe d'optimisation multi-critère. Le concept proposé ne s'oppose pas au développement résidentiel des zones périurbaines, mais son objectif est de réduire la consommation d'espace et les conséquences néfastes de la motorisation tout en satisfaisant à la demande en logement en termes quantitatifs et qualitatifs. Le concept prévoit :

- de concentrer le développement le long d'un système d'axes de transport en commun emboités ;
- de localiser dans les nœuds de ce réseau des centres de commerces et services de différents niveaux qui bénéficient d'une bonne accessibilité grâce à leurs aires de chalandises radio-concentriques ;
- de mettre en place des configurations spatiales qui intègrent une bonne accessibilité visuelle et physique au paysage ouvert en articulant, à travers les échelles, zones construites et paysage ouvert ;
- de préserver une diversité du paysage à travers un système emboité d'espaces naturels et agricoles qui conserve de grands espaces contigus non construits ;
- d'éviter le morcellement aussi bien des zones non-urbanisées que des zones urbanisées.

Pour en illustrer la logique, nous avons modifié le schéma de Christaller en utilisant une modélisation multi-fractale (Figure 1). Ce schéma reprend la logique hexagonale de Christaller mais introduit une configuration spatiale multi-échelle qui rapproche les lieux à urbaniser d'axes de transport destinés à accueillir des systèmes de transport en commun.

Figure 1. Réseau des lieux centraux de Christaller (a) et réseau hexagonal (multi)fractal (b) – Source : Frankhauser P., Tannier C., Houot H., Vuidel G. (2007), Approche fractale de l'urbanisation. Méthodes d'analyse d'accès et simulations multi-échelles, Proceedings of the 11th World Conference on Transportation Research, Berkeley, USA.



Le concept proposé ne remet pas en cause les formes d'urbanisation existantes (raser et reconstruire – proposer de nouvelles formes de quartiers ou de lotissements qui soient davantage "durables"), ni tente de contrer les choix résidentiels actuels (interdire la construction de maisons individuelles dans le périurbain – densifier les zones déjà bâties...). L'idée consiste à infléchir progressivement la trajectoire du système vers une plus grande diversité du semis des bâtiments à travers les échelles, qui devrait être accompagnée par des opérations d'aménagement plus directes notamment le renforcement de l'urbanisation autour des points de forte accessibilité, afin d'augmenter les densités au plus près des réseaux de transports en commun.

Les détails de ce concept figurent dans le rapport du projet « Vers des déplacements péri-urbains plus durables : propositions de modèles fractals opérationnels d'urbanisation » [Frankhauser et al., 2007a]. Dans ce rapport, nous avons également illustré la manière dont il est possible de transcrire les objectifs sous forme de règles qui servent à développer de manière concrète des scénarios d'aménagement.

Trois axes méthodologiques

Développement d'un logiciel d'aide à la décision pour l'aménagement des espaces périurbains

Le projet vise à rendre opérationnel le concept d'aménagement urbain développé dans le cadre du projet initial à travers la mise en place d'un outil informatique qui permet de simuler des scénarios de développement de façon interactive à partir d'une représentation cartographique sur écran de l'espace en question. Cet outil, intitulé MUP-city, intègre les éléments suivants :

- définition de normes d'accès (distances) et de normes morphologiques multi-échelles (dimension fractale, indicateurs morphologiques...),
- diagnostic des accessibilités (mesure de l'existant),

- élaboration de scénarios d'aménagement fractal à partir d'une interface graphique,
- évaluation des scénarios simulés.

MUP-City s'appuie sur plusieurs concepts de modélisation, essentiellement issus de l'intelligence artificielle, en les articulant de manière inhabituelle et innovante.

• **les systèmes experts** : un système expert est un outil informatique qui peut servir d'outil d'aide à la décision. Il permet à l'utilisateur de répondre à des questions sur un domaine précis. Il propose des solutions à partir d'un raisonnement qui s'appuie à la fois sur des faits et des règles implantés dans le logiciel. Au delà des données et des règles, le *moteur d'inférence* qui fait partie du système d'expert est capable de produire de nouveaux faits. Comme MUP-city est un outil interactif qui propose au décideur, à partir de règles d'évaluation, des endroits propices à l'implantation de zones résidentielles, sa logique s'approche de celle d'un système expert. Toutefois il n'inclut pas de moteur d'inférence, car il ne crée pas lui-même de nouveaux faits. Il s'agit donc plutôt d'un « système d'évaluation ».

• **les automates cellulaires (AC)** : les AC sont, en géographie et en aménagement du territoire, utilisés pour simuler le développement potentiel d'un territoire donné. Le territoire est couvert d'une grille et, à chaque cellule de cette grille, une utilisation du sol est affectée. Un jeu de règles sert à transformer *pas à pas* le tissu donné au départ. Les règles définissent donc une *dynamique intrinsèque*. Le point commun de MUP-city avec les AC est le découpage de l'espace en cellules et l'introduction de règles de voisinage qui servent à évaluer le potentiel de transformation d'une cellule d'un état donné, en général non construit, en un autre état (par exemple, constructible). Toutefois MUP-city ne génère pas de transformations successives de l'état actuel car c'est *l'utilisateur* qui choisit les cellules constructibles dans le futur. C'est donc lui qui est à l'origine des transformations de l'occupation du sol et les règles servent uniquement à contraindre son choix.

• **les « systèmes de fonctions itératives »** (Iterative function systems – IFS) [Barnsley, 1988] : il s'agit de fonctions mathématiques qui servent à générer des structures fractales par ordinateur. Elles transcrivent la forme d'un générateur fractal sous forme de matrices et permettent ainsi de construire étape par étape une fractale. Comme la simulation avec MUP-City considère de manière itérative des échelles d'analyse de plus en plus fines (découpage de l'espace en cellules de taille de plus en plus petite) en respectant les mêmes paramètres fractals tout au long de la simulation, l'application suit une logique équivalente à celle d'une IFS.

Dans le cadre du projet il s'est avéré utile de développer plusieurs versions de l'outil informatique MUP-City :

Outil de simulation : les premiers développements de MUP-City (versions 0.1 à 0.3) ont permis de simuler des scénarios de développement résidentiel à partir de modèles spatiaux fractals et non-fractals, pour explorer leurs propriétés morphologiques et l'accessibilité aux aménités qui leur est propre. La comparaison des scénarios sert à vérifier dans quelle mesure les objectifs du concept d'aménagement proposé sont atteints.

Outil interactif d'aide à la décision : les développements ultérieurs (version 0.7) ont transformé MUP-City en un véritable outil d'aide à la décision qui fournit la possibilité de développer à l'écran, de manière interactive, des scénarios de développement résidentiel. La conception de scénarios suit la logique multi-échelle du concept d'aménagement, en passant d'une échelle globale à des échelles de plus en plus fines. L'outil intègre différentes normes et règles morphologiques énoncées dans [Frankhauser et al., 2007a] et met à disposition de l'utilisateur certaines informations importantes telles que les accessibilités aux aménités.

Outre le développement du logiciel d'autres questions méthodologiques ont été considérées.

Une méthode pour évaluer l'accessibilité aux commerces et services

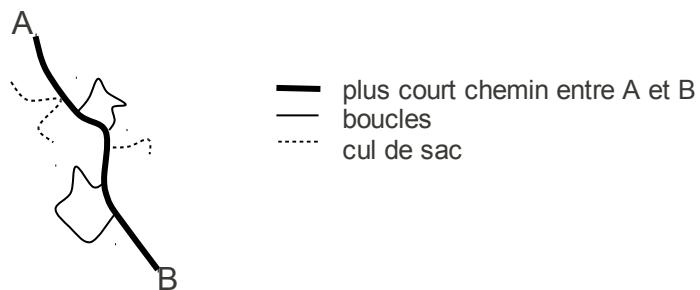
Les accessibilités aux services et commerces sont évaluées à partir d'aires de chalandises qui correspondent à des distances maximales admises (par exemple 400 m. à pied), mesurées sur le réseau de transport. Dans le projet préliminaire, ces aires de chalandises étaient considérées séparément pour chaque type de service/commerce appartenant à un niveau de service (ex : boucherie-charcuterie-traiteur, boulangerie, école, tabac-presse, supermarché-hypermarché pour le niveau 1). Cette démarche ne paraissait cependant pas réaliste car le résident n'évalue pas l'accès à ces lieux de manière isolée, mais il accepte une certaine distance à parcourir entre les lieux où sont implantés les différents services/commerces. Il se forge ainsi une opinion synthétique sur l'accessibilité à un ensemble de services et commerces. Pour cette raison la notion d'agrégat commercial et de service a été introduite. En tenant compte à la fois de son attractivité potentielle et de sa distance au domicile d'un résident, on peut construire une mesure d'accessibilité qui caractérise chaque agrégat. En cohérence avec le principe de modélisation multi-échelle, cette mesure est réalisée pour toute une série d'échelles d'analyse.

Des méthodes complémentaires pour analyser la morphologie des réseaux

Dans le cadre du précédent projet, différentes méthodes avaient été développées pour évaluer à la fois l'accessibilité aux services et commerces au regard d'une organisation spatiale radio-concentrique et pour analyser la répartition fractale des branches du réseau de transport. La comparaison des résultats obtenus en utilisant deux méthodes, l'analyse d'accessibilité et l'analyse d'accès², permet de mettre en évidence à la fois la plus ou moins bonne localisation d'un service par rapport à son accessibilité par le réseau, mais aussi d'identifier des zones de développement potentiel vu leur bonne accessibilité aux services. L'utilisation de l'analyse d'accès exige plusieurs étapes de prétraitement et d'analyse en recourant à différents logiciels. Afin de rendre cette méthode plus opérationnelle, nous avons choisi de l'intégrer complètement dans le logiciel Fractalyse³.

Une des idées du projet est d'assurer une bonne accessibilité aux services tout en réduisant par ailleurs la connectivité entre les centres de service du même niveau dans le but de limiter les déplacements. L'exploration de la connectivité du réseau est donc un élément important à prendre en compte dans le contexte donné. Plusieurs méthodes utilisées en physique pour caractériser la conductivité de certains matériaux semi-conducteurs ont paru intéressantes à étudier. Elles permettent de mettre en évidence diverses caractéristiques fractales d'un réseau (figure 2), tel que l'allongement fractal du plus court chemin entre deux points donnés (« backbone dimension »), la capacité d'accueillir des flux en incluant les boucles (dimension de connectivité), ou encore la capacité à considérer l'ensemble des branches du réseau en incluant les voies d'accès en cul de sac (dimension fractale totale du réseau).

Figure 2. Différents types de branches dans un réseau



² Cette méthode est dénommée « analyse de desserte » dans le projet initial.

³ Le logiciel Fractalyse, en libre accès, a été développé à ThéMA. Il sert à réaliser différents types d'analyses fractales. Accès au site : <http://www.fractalyse.org/>

Réalisation

Le projet a été réalisé sous forme de différentes opérations qui correspondent aux étapes de réalisation du projet.

Opération 1
Élaboration de la méthode servant à évaluer l'accessibilité aux commerces et services à partir de la constitution d'agrégats de services et commerces, en tenant compte de leur diversité, de leur nombre et de leur localisation. Introduction des mesures qui synthétisent l'attractivité et l'accessibilité des agrégats.
Opération 2
Développement de l'outil de simulation qui permet de générer des scénarios de développement résidentiel fractal et non-fractal. Le but est d'évaluer les impacts de certains paramètres du modèle (par exemple l'influence de la dimension fractale) et de comparer des scénarios fractals et non-fractals.
Opération 3
Utilisation de l'outil de simulation pour tester des modèles spatiaux théoriques fractals et non-fractals, explorer leurs propriétés morphologiques et l'accessibilité aux aménités qui leur sont propres. Réalisation de tests méthodologiques pour évaluer l'influence de certains paramètres du modèle (position de la grille d'analyse, différentes versions des règles fractales...)
Opération 4
Appliquer MUP-city pour créer des scénarios de développement résidentiel réalistes et évaluer les propriétés morphologiques et l'accessibilité aux aménités pour différents scénarios. Comparaison avec des scénarios d'aménagement basés sur le seul principe de densification, au regard de leur accessibilité aux aménités.
Opération 5
A partir de l'outil de simulation (opération 2), développement de l'outil d'aide à la décision qui permet de concevoir de manière interactive des scénarios développement. L'utilisateur dispose d'informations qui lui permettent de déterminer dans quelle mesure un site est propice à un développement résidentiel futur.
Opération 6
Intégration de l'analyse d'accès (ex-analyse de desserte) dans le logiciel Fractalyse. Cette méthode permet d'explorer la cohérence entre le bâti et le réseau. Programmation d'autres méthodes d'analyse de réseau pour évaluer d'autres propriétés des réseaux (connectivité des centres de service appartenant à des niveaux différents etc.).

PREMIÈRE PARTIE

Présentation de MUP-City

MUP-City : description méthodologique

MUP-City est une application informatique dédiée à l'identification de lieux où une urbanisation serait possible suivant un principe d'urbanisation fractale [Tannier et al., 2010]. Le principe de modélisation est celui de l'application d'une règle fractale d'urbanisation sur la base d'une représentation spatiale cellulaire multi-échelle. MUP-City comporte en outre quatre règles additionnelles, qui introduisent des contraintes d'accessibilité aux commerces et services, aux espaces ouverts, et une contrainte de proximité au réseau routier existant.

La version actuelle de MUP-City s'applique aux espaces périurbains des grandes villes françaises de taille comprise entre 100 000 et 1 000 000 d'habitants. Seule l'accessibilité à des aménités locales est considérée : accessibilité locale aux commerces et services de proximité ; proximité directe des espaces bâtis et non bâtis. L'accessibilité aux aménités de la ville-centre est considérée comme étant équivalente pour tous les habitants d'un même secteur périurbain. L'accessibilité est définie ici d'un point de vue uniquement spatial : la distance n'est pas associée à une fréquentation potentielle qui varierait selon le nombre et le type d'individus d'une aire de chalandise.

Modélisation spatiale multi-échelle

La zone d'étude est couverte d'une grille régulière carrée. Chaque maille de la grille contient un nombre fixe de cellules. Le nombre de cellules par maille est déterminé par un facteur de réduction r . Avec r égal à 1/3, la maille contient neuf cellules. La modélisation multi-échelle consiste en la réduction de la taille de la maille d'un niveau d'analyse au suivant (Figure 3, page 18). Initialement, la taille de la maille est égale à l_1 . Au niveau d'analyse suivant, chaque maille de taille l_1 est décomposée en mailles de taille l_2 , correspondant en fait aux cellules du niveau précédent.

$$l_2 = r l_1 \quad [1]$$

Cette procédure de décomposition de mailles en cellules est réitérée jusqu'à ce que la taille des cellules s'approche de celle des bâtiments.

En divisant le nombre de cellules bâties par la surface totale du carré initial, nous obtenons la densité bâtie. Cette densité change en passant d'une étape de décomposition i à la suivante $i+1$, car dans chacune des mailles bâties apparaissent de nouvelles cellules vides dont la taille devient à chaque étape de plus en plus petite. Ainsi, d'une étape de décomposition à une autre, la densité du bâti est réduite par un facteur qui correspond à la part de la surface bâtie dans chaque maille, considérant une étape donnée i . Si la structure spatiale bâtie de la zone d'étude est fractale, alors pour une dimension fractale donnée, la baisse de la densité constatée à l'étape de décomposition i , ρ_i est liée à celle de l'étape suivante ρ_{i+1} par la relation suivante [Batty, 1992; Thomas et al, 2007] :

$$\frac{\rho_{i+1}}{\rho_i} = \left(\frac{1}{r^2} \right) N = (r)^{(2-D)} \quad [2]$$

où D est la dimension fractale bâtie. Ainsi la modélisation multi-échelle adoptée, permet de tenir compte de la variation de la densité bâtie d'un niveau d'analyse à un autre.

Règle fractale d'urbanisation

L'hypothèse présidant à l'introduction d'une règle d'urbanisation fractale est que l'organisation fractale d'un tissu bâti permet une bonne accessibilité à des aménités variées [Cavaillès et al., 2004; Frankhauser & Genre-Grandpierre, 1998], tout en minimisant la fragmentation des espaces bâtis et non bâtis [Frankhauser,

2000]. Considérant une succession de niveaux d'analyse, on peut calculer la dimension fractale d'auto-similarité D d'un tissu bâti à partir de la relation suivante :

$$D = \frac{\log N}{\log r} \quad [3]$$

N étant le nombre d'éléments bâti à chaque niveau d'analyse et r le facteur de réduction d'un niveau d'analyse à un autre.

La dimension fractale D est une mesure synthétique caractérisant la non-uniformité de la distribution spatiale d'un phénomène à travers les échelles [De Keersmaecker et al., 2003]. Différentes valeurs de dimensions fractales permettent de différencier des tissus bâti aux propriétés topologiques différentes : connexes, non connexes ou partiellement connexes à travers les échelles. En ce sens, la dimension fractale peut être considérée comme un modèle d'urbanisation. Le tableau 1, montre que plus la dimension fractale est élevée, moins la baisse de la densité bâti d'un niveau d'analyse i au niveau d'analyse suivant $i+1$ est importante. En effet, plus la dimension fractale est élevée, plus le bâti est réparti spatialement de manière uniforme. La taille des espaces non bâti varie alors moins, et l'effet de concentration du bâti en passant d'une échelle spatiale fine à une échelle spatiale plus grossière se fait moins ressentir. Pour mémoire, une répartition entièrement homogène du bâti correspond à la valeur de dimension fractale D égale à 2.

Tableau 1. Dimension fractale, nombre de cellules occupées par maille et baisse de densité bâti entre deux niveaux d'analyse i et $i+1$, pour un facteur de réduction r égal à $1/3$ — Source : FRANKHAUSER P., TANNIER C., VUIDEL G., HOUOT H. (à paraître), Une approche multi-échelle pour le développement résidentiel des nouveaux espaces urbains, in J.-P. Antoni (Ed) *Modéliser la ville. Forme urbaine et politiques de transport*, Economica, Coll. Méthodes et approches.

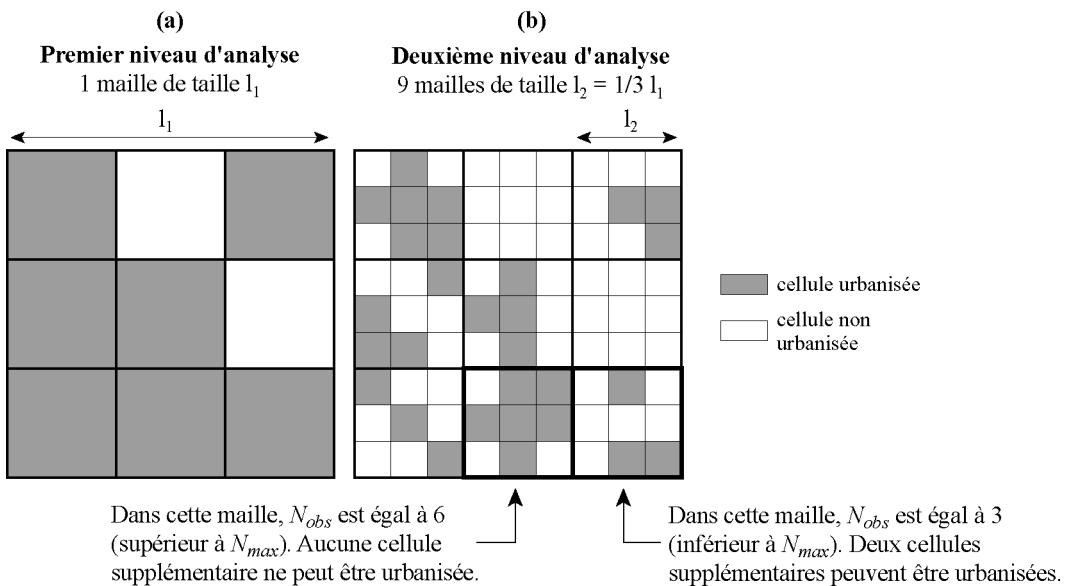
Dimension fractale D	Nombre N de cellules bâties par maille	$\frac{\rho_{i+1}}{\rho_i}$
1.26	4	0.44
1.46	5	0.55
1.63	6	0.67
1.77	7	0.78

Dans MUP-City, le choix d'une règle fractale d'urbanisation correspond au choix d'une dimension fractale du tissu bâti à venir. Ce choix se traduit concrètement par la définition d'un nombre maximal N_{max} de cellules pouvant être bâties par maille et par le choix du facteur de réduction r . Une variable N_{obs} décrit le nombre de cellules actuellement urbanisées dans chaque maille. En pratique, nous travaillons sur un r constant, égal à $1/3$. En effet, avec r égal à $1/2$, les possibilités de variations quant à l'arrangement des cellules bâties les unes par rapport aux autres sont restreintes. Inversement, avec un r égal à $1/4$ ou davantage, c'est le nombre de niveaux d'analyse qui est restreint. N_{max} varie, lui, selon les scénarios d'aménagement mais pour un scénario donné, N_{max} est fixe pour tous les niveaux d'analyse. Considérons par exemple le cas d'un tissu bâti de dimension fractale D égale à 1,46, ce qui correspond à une valeur observée N_{obs} égale à 5 pour r égal à $1/3$. Il est possible d'augmenter la dimension fractale de ce tissu à 1,63 ce qui correspond à N_{max} égal à 6 pour un r toujours égal à $1/3$. Dans tous les cas, la dimension fractale d'un tissu bâti ne devrait pas dépasser 1,8 pour maintenir une certaine hiérarchie des espaces vides (Frankhauser, 2004).

La valeur de N_{obs} est une moyenne du nombre de cellules bâties par maille également bâties considérant successivement chaque niveau d'analyse. Il est donc possible que, dans certaines mailles, N_{obs} soit supérieur à N_{max} tandis que, d'un point de vue général, N_{obs} est inférieur à N_{max} (figure 3). Si une maille de taille l_1 n'est pas bâtie, les cellules de taille l_2 qui appartiennent à cette maille ne peuvent pas être bâties. Ce faisant, MUP-City fonctionne strictement sur la base d'un principe d'urbanisation fractale, c'est-à-dire guidée par l'emboîtement et la préservation des espaces libres (et non des espaces bâti) d'une échelle globale à une échelle locale. La décomposition multi-échelle, de mailles en cellules, permet l'ajout d'une composante

spatiale à la règle fractale définie via les paramètres N_{max} et r . Elle détermine donc largement la forme de l'urbanisation proposée par MUP-City ; mais elle permet aussi de tenir compte d'aspects essentiels de l'organisation spatiale de l'espace étudié, notamment l'emboîtement hiérarchique des espaces ouverts. Ainsi, la règle fractale impose aux extensions urbaines simulées une *auto-similarité statistique* tandis que la décomposition fractale leur impose une *quasi auto-similarité* (répétition de la même logique de répartition spatiale des éléments les uns par rapport aux autres) [Tannier, 2009b].

Figure 3. Exemple d'application de la règle fractale d'urbanisation avec N_{max} égal à 5 sur la base de la modélisation spatiale multi-échelle — Source : FRANKHAUSER P., TANNIER C., VUIDEL G., HOUOT H. (à paraître), Une approche multi-échelle pour le développement résidentiel des nouveaux espaces urbains, in J.-P. Antoni (Ed) *Modéliser la ville. Forme urbaine et politiques de transport*, Economica, Coll. Méthodes et approches.



Suite à l'application de la règle fractale d'urbanisation, on connaît le nombre de cellules potentiellement urbanisables dans chaque maille de la grille. Quatre règles d'accessibilité additionnelles permettent ensuite de choisir les cellules à urbaniser parmi les cellules potentiellement urbanisables.

Quatre règles additionnelles d'accessibilité

Ces quatre règles introduisent des contraintes d'accessibilité aux commerces et services, aux espaces ouverts, et une contrainte de proximité au réseau routier existant (Figure 4). Chaque règle est décrite au moyen d'une ou deux variables (Tableau 2), formalisées sous la forme de fonctions d'appartenance floues [Zadeh, 1965]. La combinaison des variables dans une règle fait appel à des opérateurs d'agrégation également issus de la théorie des sous-ensembles flous [Yager, 1978; Zimmermann, 1987; Zimmermann & Zysno, 1983]. Chaque cellule est donc caractérisée par quatre valeurs d'évaluation comprises entre 0 et 1, une pour chacune des règles, la valeur 1 correspondant à une évaluation maximale. Ces quatre valeurs sont ensuite agrégées par une moyenne arithmétique, afin d'obtenir, pour chaque cellule, une évaluation synthétique de son intérêt à être urbanisée. Les règles ne sont pas pondérées selon leur importance, et ceci est un choix délibéré dans MUP-City. En effet, le système a été conçu en vue du test de nombreux scénarios d'urbanisation et non de la détermination d'une seule et unique solution optimale. L'idée est qu'en l'absence de pondération, l'utilisateur sera poussé à effectivement créer différents scénarios, notamment via l'activation ou non de l'une ou l'autre des règles. Au final, le système sélectionne dans chaque maille les cellules les plus intéressantes à urbaniser parmi les cellules potentiellement urbanisables. En cas d'ex-aequo, la sélection d'une ou plusieurs cellules est faite de manière aléatoire.

Figure 4. Règles d'accessibilité dans MUP-City 0.3 — Source : FRANKHAUSER P., TANNIER C., VUIDEL G., HOUOT H. (à paraître), Une approche multi-échelle pour le développement résidentiel des nouveaux espaces urbains, in J.-P. Antoni (Ed) *Modéliser la ville. Forme urbaine et politiques de transport*, Economica, Coll. Méthodes et approches.

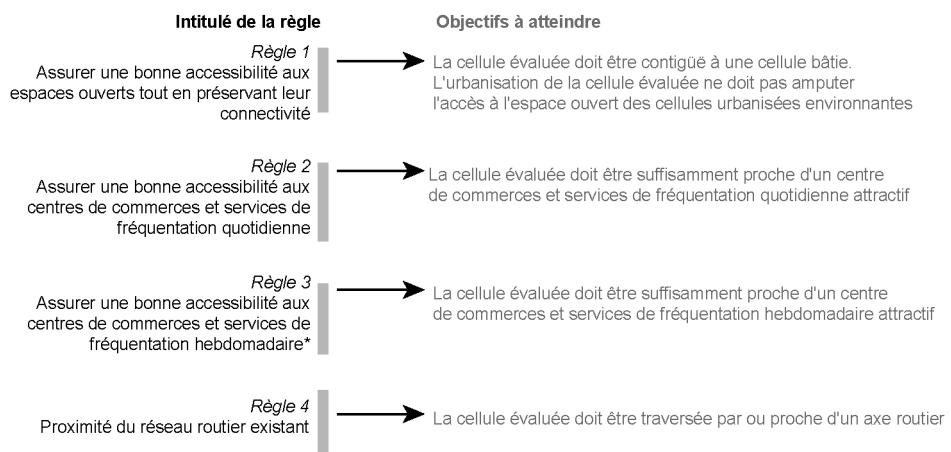


Tableau 2. Critères d'évaluation correspondant aux règles d'accessibilité — Source : TANNIER C., VUIDEL G., FRANKHAUSER P., HOUOT H. (2010), Simulation fractale d'urbanisation - MUP-city, un modèle multi-échelle pour localiser de nouvelles implantations résidentielles, *Revue internationale de géomatique*, 20(3), 303-329.

	Description de la règle	Critères d'évaluation correspondants
1.	La cellule évaluée doit être contiguë à une cellule bâtie. L'urbanisation de la cellule évaluée ne doit pas amputer l'accès à l'espace ouvert des cellules urbanisées environnantes	Nombre de cellules non bâties autour de chaque cellule bâtie directement contiguë à la cellule évaluée (dans un voisinage de Moore)
2.	La cellule évaluée doit être suffisamment proche des commerces et services de fréquentation quotidienne	Distance entre la cellule évaluée et les centres de commerces et services de fréquentation quotidienne Nombre et diversité des établissements composant chaque centre
3.	La cellule évaluée doit être suffisamment proche des commerces et services de fréquentation hebdomadaire	Distance entre la cellule évaluée et les centres de commerces et services de fréquentation hebdomadaire Nombre et diversité des établissements composant chaque centre
4.	La cellule évaluée doit être traversée par ou proche d'un axe routier	Distance à un axe routier existant

Règle 1

Cette règle doit permettre à tous les résidents d'un secteur périurbain d'avoir un accès direct aux espaces ouverts en évitant la fragmentation des espaces bâties et non bâties. A l'heure actuelle, les espaces ouverts sont assimilés aux espaces non bâties, ce qui représente une simplification importante de la réalité et devra être affiné par la suite. Pour être intéressante à urbaniser au regard de la règle 1, une cellule doit avoir :

- au moins une cellule non bâtie dans son voisinage immédiat, ce qui permet d'assurer la proximité directe de la cellule aux espaces non bâties ;
- des cellules non bâties contiguës aux cellules bâties appartenant à son voisinage immédiat, afin de préserver la proximité directe aux espaces non bâties pour les cellules déjà bâties ;
- le plus grand nombre possible de cellules bâties autour de la cellule évaluée tout en répondant aux deux conditions énoncées ci-avant.

La formalisation de la règle est déduite de l'analyse de toutes les configurations spatiales possibles de 5×5 cellules. La cellule centrale représente la cellule évaluée ; elle peut avoir de 0 à 8 cellules bâties autour d'elle ; toutes les autres cellules sont non bâties. Selon cette configuration théorique, une cellule a au maximum 34 cellules non bâties voisines des cellules bâties qui lui sont directement contiguës (Figure 5). Ce nombre est atteint quand 6 cellules bâties sont contiguës à la cellule évaluée, ce qui survient notamment quand les cellules sont situées sur la bordure urbanisée.

Figure 5. Un exemple de configuration spatiale pour laquelle on dénombre 34 cellules non bâties voisines des cellules bâties directement contiguës à la cellule évaluée

					Cellule évaluée E	
					Numéro des cellules bâties voisines de E	Nombre de cellules non bâties dans leur voisinage
	n°1			n°4		
n°2		E	n°5			
n°3			n°6			

$n^1 \rightarrow 6$
 $n^2 \rightarrow 5$
 $n^3 \rightarrow 6$
 $n^4 \rightarrow 6$
 $n^5 \rightarrow 5$
 $n^6 \rightarrow 6$

34

Concrètement, la règle 1 consiste à compter, pour chaque cellule bâtie dans le voisinage immédiat de la cellule évaluée, le nombre de cellules non bâties qui lui sont directement contiguës. La somme de ces nombres donne la valeur d'entrée de la règle. Une fonction d'appartenance $\mu(x)$ décrit la variable sous la forme d'un degré d'appartenance à un sous-ensemble flou « bonne évaluation ».

$$\mu(x) = 34/x \text{ avec } \mu(x) \in [0 ; 1] \quad [3]$$

x étant la somme du nombre de cellules non bâties voisines de chaque cellule bâtie directement contiguë à la cellule évaluée

Quand la cellule évaluée est entourée de 8 cellules bâties le nombre de cellules non bâties qui leur sont voisines est également élevé (32). La valeur d'évaluation obtenue est alors très bonne (proche de 1), alors même que l'accessibilité directe de la cellule évaluée à l'espace ouvert (i.e. sa proximité directe à des cellules non bâties) est mauvaise. Dans cet unique cas, correspondant à une seule configuration spatiale possible, la règle 1 fonctionne mal.

Règles 2 et 3

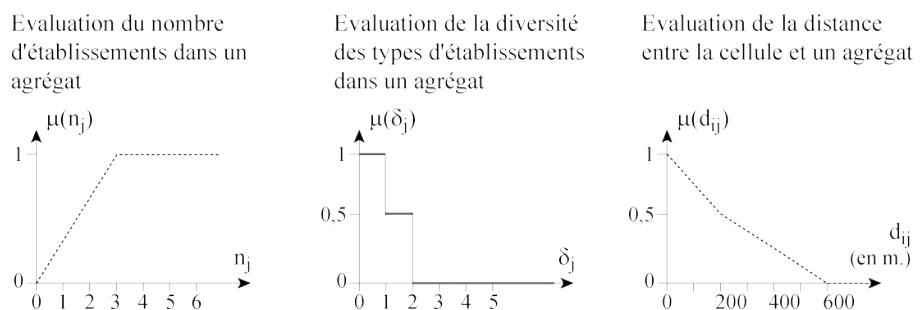
Deux types de commerces et services sont distingués, selon leur fréquence de recours potentielle : d'une part, les commerces et services de fréquentation quotidienne, parmi lesquels sont considérés les boucheries-charcuteries-traiteurs, boulangeries, écoles, tabacs-presses et supermarchés-hypermarchés ; d'autre part, les commerces et services de fréquentation hebdomadaire (réparations automobiles, hypermarchés-supermarchés, médecins, supérettes, pharmacies, postes, cafés). Les établissements ne sont pas pris en compte isolément les uns des autres, mais comme constituant des agrégats. Un agrégat est composé soit, d'un établissement isolé, soit d'au moins deux établissements éloignés de moins de 200 m. Un agrégat peut être caractérisé à la fois par une fréquentation quotidienne et hebdomadaire.

L'accessibilité d'une cellule à un agrégat commercial est définie comme la combinaison l'attractivité de cet agrégat et de la distance qui le sépare de la cellule : une petite distance (dans tous les cas inférieure à 200 m)

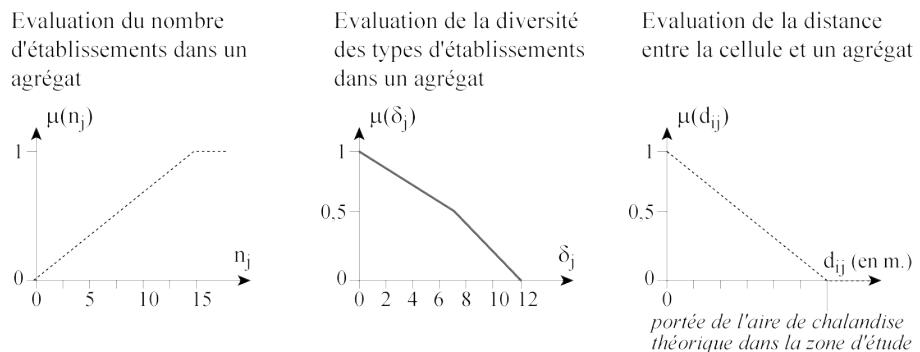
augmente l'accessibilité d'un agrégat ; une longue distance (supérieure à 200 m) la diminue. L'attractivité d'un agrégat est fonction du nombre d'établissements qu'il comporte et de leur diversité. L'accessibilité de la cellule à l'ensemble de l'offre en commerces et services est évaluée en tenant compte de tous les agrégats commerciaux présents, et non d'un seul. Les principes de cette évaluation sont les suivants : mieux vaut un seul agrégat très accessible que deux agrégats moyennement accessibles ; à accessibilité équivalente, mieux vaut deux agrégats qu'un seul ; un seul agrégat très accessible est quasiment aussi intéressant qu'un agrégat très accessible et un agrégat très peu accessible.

Figure 6. Définition des fonctions d'évaluation dans les règles d'accessibilité aux commerces et services — Source : TANNIER C., VUIDEL G., FRANKHAUSER P., HOUOT H. (2010), Simulation fractale d'urbanisation - MUP-city, un modèle multi-échelle pour localiser de nouvelles implantations résidentielles, *Revue internationale de géomatique*, 20(3), 303-329.

Evaluation des agrégats de fréquentation potentielle quotidienne



Evaluation des agrégats de fréquentation potentielle hebdomadaire



Formellement, les règles 2 et 3 sont définies comme suit. Soient :

- un ensemble de cellules : $i = (1, 2, \dots, k)$
- un ensemble d'agrégats de commerces et services : $j = (1, 2, \dots, l)$
- le nombre de commerces et services dans un agrégat j : n_j
- la diversité des établissements (nombre de types d'établissements différents) dans un agrégat j : δ_j
- la distance (mesurée sur le réseau) entre une cellule i et un agrégat j : d_{ij}
- l'accessibilité d'une cellule i à un agrégat j : Y_{ij}

$$Y_{ij} = \left[\mu(n_j)^{\mu(\delta_j)} \mu(d_{ij}) \right]^{1-\mu(d_{ij})} \cdot \left[1 - \left(1 - \mu(n_j)^{\mu(\delta_j)} \right) \left(1 - \mu(d_{ij}) \right) \right]^{\mu(d_{ij})} \quad [4]$$

φ_i donne l'évaluation de l'accessibilité d'une cellule à l'ensemble des agrégats de commerces et services de fréquentation quotidienne.

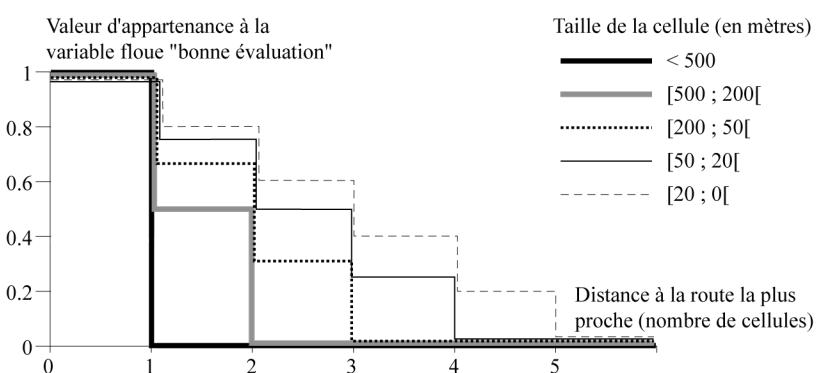
$$\varphi_i = 1 - \prod (1 - Y_{ij}) \quad [5]$$

Les équations 4 et 5 permettant de calculer les valeurs de Y_{ij} et de φ_i consistent en l'application de l'opérateur de [Zimmermann, 1983]. La définition des fonctions $\mu(n_j)$, $\mu(\delta_j)$ et $\mu(d_{ij})$ pour les commerces et services de fréquentation quotidienne et hebdomadaire est donnée dans la figure 6.

Règle 4

L'objectif de cette règle est de limiter la consommation d'espace en minimisant la construction de nouvelles extensions routières. La définition de la règle varie en fonction de la taille de la cellule (figure 7). Par exemple, pour une cellule de 540 m. de côté, la valeur d'évaluation sera égale à 1 si la cellule évaluée contient un tronçon routier, et égale à 0 dans le cas contraire. Pour une cellule de 20 m. de côté, la valeur d'évaluation sera toujours égale à 1 si la cellule évaluée contient un tronçon routier. Cependant, elle sera encore égale à 0,8 si elle-même n'en contient pas, mais que l'une des cellules adjacentes en contient ; égale à 0,6 si elle-même et les cellules qui lui sont adjacentes n'en contiennent pas, mais que l'une des cellules qui lui sont contigües d'ordre 2 en contient ; etc.

Figure 7. Formalisation de la règle de proximité au réseau routier existant — Source : TANNIER C., VUIDEL G., FRANKHAUSER P., HOUOT H. (2010), Simulation fractale d'urbanisation - MUP-city, un modèle multi-échelle pour localiser de nouvelles implantations résidentielles, *Revue internationale de géomatique*, 20(3), 303-329.

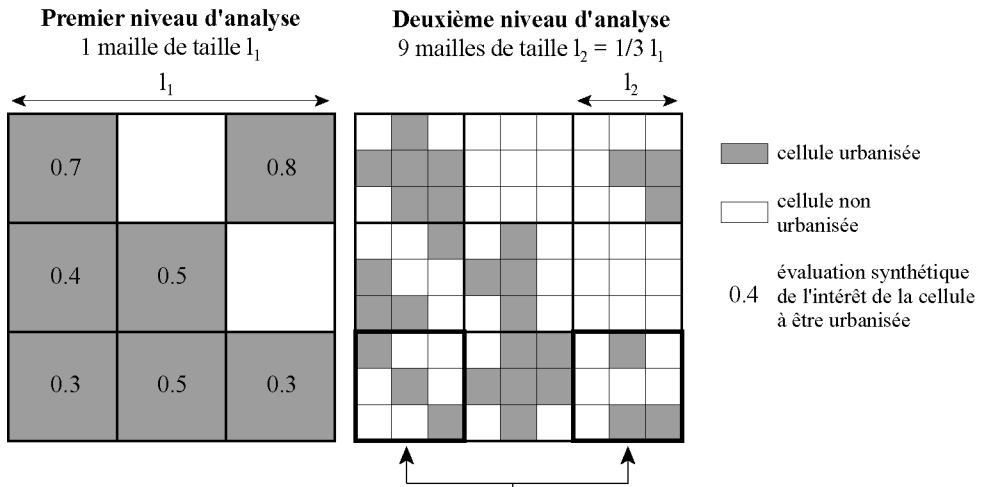


Deux variantes dans l'application des règles d'urbanisation

MUP-city permet de développer des scénarios de développement résidentiel selon deux variantes : « basique » (présentée en Figure 3, page 18) et « stricte » (Figure 8). Avec la variante « stricte », le nombre N_{max} ne peut être dépassé pour une urbanisation future. Ainsi, si dans une maille le nombre de cellules urbanisées N_{obs} est supérieur à N_{max} , les $N_{obs} - N_{max}$ cellules les moins bien évaluées ne seront plus urbanisables lors des étapes de décomposition suivantes. La variante « basique » admet, elle, qu'une urbanisation est possible pour l'ensemble des cellules déjà urbanisées, quelle que soit l'étape de décomposition, en respectant évidemment la limite N_{max} pour les étapes suivantes.

MUP-City permet aussi de développer des scénarios d'urbanisation non-fractals en travaillant uniquement à l'étape de décomposition la plus fine et en appliquant simplement tout ou partie des quatre règles additionnelles d'accessibilité.

Figure 8. Variante « stricte » de la règle fractale d'urbanisation avec $N_{max} = 5$ — Source : FRANKHAUSER P., TANNIER C., VUIDEL G., HOUOT H. (à paraître), Une approche multi-échelle pour le développement résidentiel des nouveaux espaces urbains, in J.-P. Antoni (Ed) *Modéliser la ville. Forme urbaine et politiques de transport*, Economica, Coll. Méthodes et approches.



Dans ces deux mailles, aucune nouvelle cellule ne peut être urbanisée.

En effet, au premier niveau d'analyse N_{obs} est supérieur à N_{max} et ces deux mailles sont caractérisées par les plus mauvaises valeurs d'évaluation.

Prise en compte de la densité bâtie locale

Par défaut, la règle fractale d'urbanisation impose d'urbaniser dans toutes les mailles où préexiste au moins un bâtiment. Ce faisant, le modèle peut identifier des cellules intéressantes à urbaniser dans des zones quasiment vides, souvent éloignées de tout centre de commerces et services. Pour éviter ce phénomène, MUP-City permet d'introduire un seuil densité en-dessous duquel une maille est considérée comme étant non bâtie. Ainsi, à une étape de décomposition i , davantage de mailles sont considérées comme non bâties et ne peuvent être urbanisées à l'étape de décomposition $i+1$. Avec, par exemple, un seuil de densité bâtie égal à 1×10^{-4} , une maille de 1620 m. de côté est considérée comme non bâtie si elle comporte moins de 262,44 m² de bâti (soit l'équivalent de deux maisons individuelles). De la même manière, une maille de 180 m. de côté est considérée comme non bâtie si elle comporte moins de 3,24 m² de bâti.

Zones non constructibles

La prise en compte de zones non constructibles s'inscrit dans la logique multi-échelle de MUP-City. Si une maille contient une part de surface non constructible supérieure à la part de surface urbanisable (correspondant au nombre de cellules urbanisables), alors la maille n'est pas urbanisable. En revanche, si une maille contient une part de surface non constructible inférieure à la part de surface urbanisable, alors la maille peut être urbanisée. Dans ce cas, les zones non constructibles empêcheront l'urbanisation quand on considérera des mailles de plus petite taille.

Déroulé d'une simulation avec MUP-City

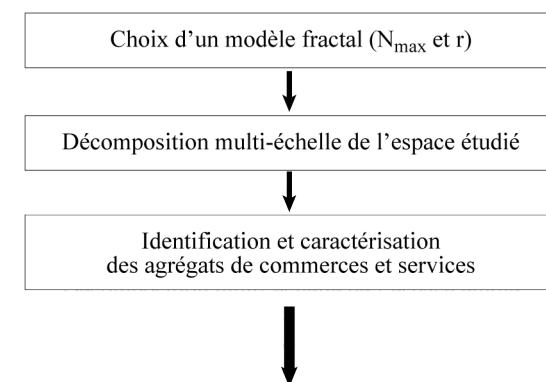
En entrée, MUP-City requiert quatre types de données issues de systèmes d'information géographiques :

- le réseau routier détaillé (lignes), sans attribut pour décrire les tronçons ;
- les bâtiments (polygones), sans attribut les décrivant ;
- les commerces et services (points), décrits par deux attributs qui sont le type (boulangerie, supérette, coiffeur...) et la fréquence de recours (quotidienne et/ou hebdomadaire) ;
- les zones non constructibles (polygones) : zones naturelles d'intérêt écologique remarquable, surfaces en eau, zones inondables...

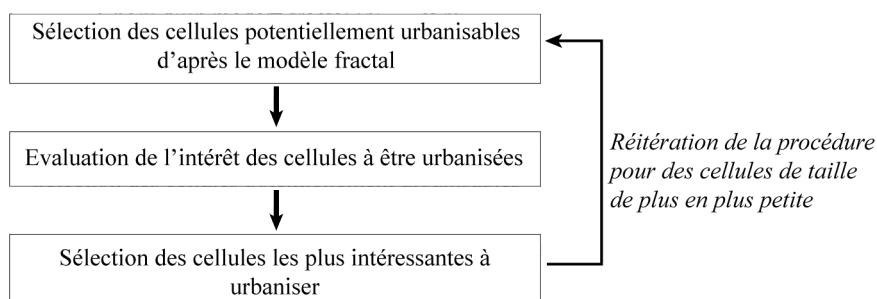
Ces données ont été choisies pour leur simplicité et leur usage courant dans le monde de l'aménagement urbain, du moins en France. En effet, la plupart des agences d'urbanisme françaises disposent de bases de données urbaines précises (notamment le Référentiel à grande échelle de l'IGN). Les informations relatives aux commerces et services peuvent être obtenues à partir du fichier SIRENE de l'INSEE et de l'annuaire des pages jaunes sur Internet.

Figure 9. Déroulé d'une simulation avec MUP-City — Source : TANNIER C., VUIDEL G., FRANKHAUSER P., HOUOT H. (2010), Simulation fractale d'urbanisation - MUP-city, un modèle multi-échelle pour localiser de nouvelles implantations résidentielles, *Revue internationale de géomatique*, 20(3), 303-329.

Définition du projet d'aménagement



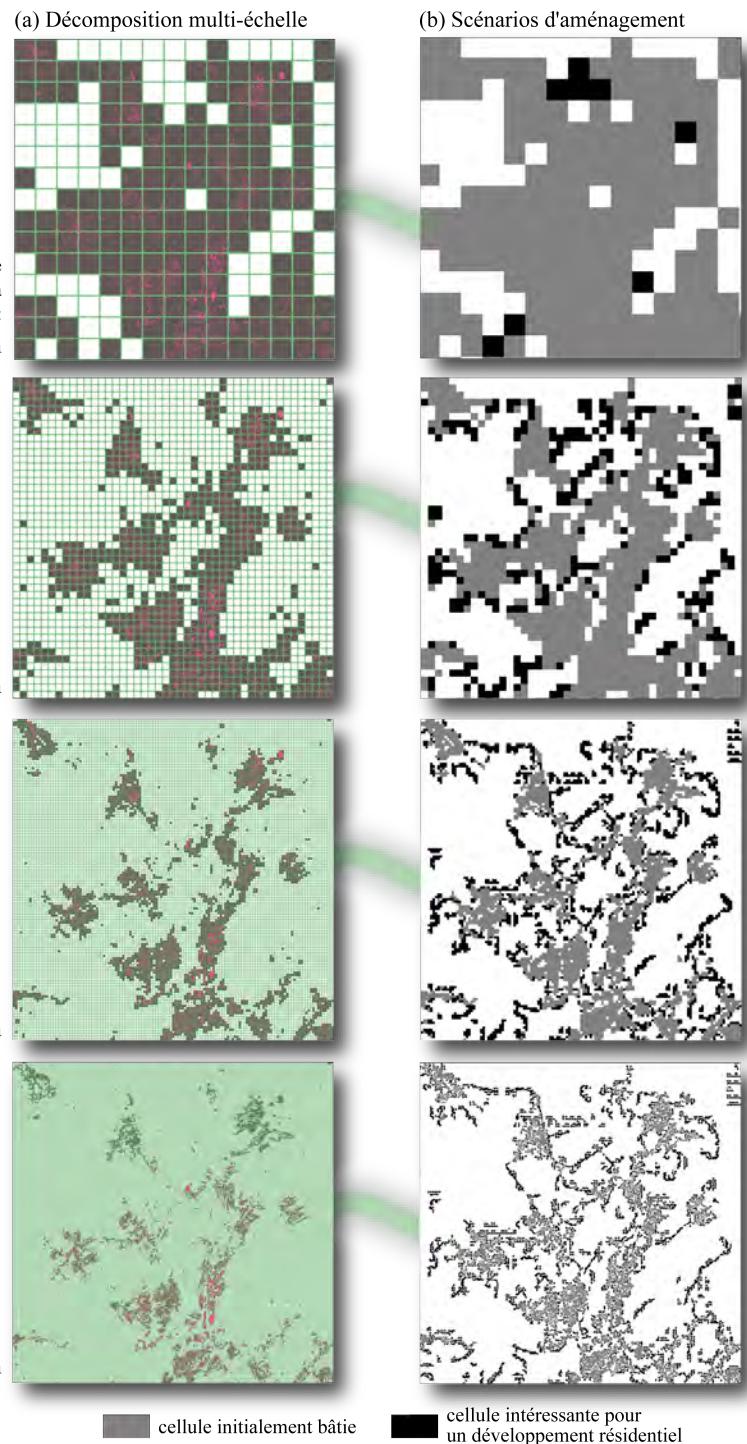
Application du projet d'aménagement selon une logique multi-échelle



La création d'un scénario d'urbanisation se déroule en deux temps (figure 9). Le projet d'aménagement est d'abord défini, puis appliqué selon une logique multi-échelle. La taille de la cellule à la dernière étape de décomposition est fixée par l'utilisateur. L'évaluation de l'intérêt des cellules à être urbanisées correspond au calcul des quatre règles d'accessibilité. Cette évaluation, ainsi que la sélection des cellules intéressantes à urbaniser, se fait de manière dynamique : les cellules sont évaluées ; une cellule parmi les mieux évaluées est sélectionnée ; les évaluations sont re-calculées ; une deuxième cellule parmi les mieux évaluées est

sélectionnée... L'opération se poursuit ainsi de manière itérative jusqu'à ce que la sélection de cellules supplémentaires ne soit plus possible. Dans une maille, quand il y a des *ex-aequo* parmi les cellules évaluées, le choix de l'une ou l'autre cellule est fait de manière aléatoire.

Figure 10. Exemple de résultats obtenus avec MUP-City 0.3 — Source : TANNIER C., VUIDEL G., FRANKHAUSER P., HOUOT H. (2010), Simulation fractale d'urbanisation - MUP-city, un modèle multi-échelle pour localiser de nouvelles implantations résidentielles, *Revue internationale de géomatique*, 20(3), 303-329.



Au final, l'application fournit une cartographie des cellules intéressantes à urbaniser pour le scénario considéré. Un scénario se définit par une valeur de N_{max} , une taille de cellule à la dernière étape de décomposition (en général comprise entre 50 et 20 m.), le positionnement de la grille de décomposition multi-échelle, et l'activation ou non de chacune des règles additionnelles d'accessibilité. La création de scénarios peut aussi intégrer une ou plusieurs modifications de la configuration spatiale initiale du tissu urbain (création d'un nouvel axe de transport, modification de l'armature commerciale...).

Les résultats obtenus se présentent sous forme d'images raster au format geotiff à différentes résolutions spatiales, correspondant à la série des niveaux d'analyse considérés (figure 10).

Évaluations ex-post des scénarios simulés

Le module d'évaluation ex-post de MUP-City permet d'évaluer l'accessibilité aux commerces et services et aux espaces ouverts des scénarios de développement résidentiel créés avec l'application. Les critères d'évaluation ex-post calculés par MUP-City sont au nombre de huit.

- la distance moyenne de chaque cellule bâtie au commerce et service de fréquentation quotidienne le plus proche
- la distance moyenne de chaque cellule bâtie au commerce et service de fréquentation hebdomadaire le plus proche
- le nombre moyen de commerces et services de fréquentation quotidienne distants de moins de 400 m. de chaque cellule bâtie (accès à pied)
- le nombre moyen de commerces et services de fréquentation hebdomadaire distants de moins de 2 000 m. de chaque cellule bâtie (accès en vélo)
- la part de cellules bâties contigües à au moins une cellule non bâtie
- le nombre moyen de cellules non bâties contigües à chaque cellule bâtie
- la distance moyenne de chaque cellule bâtie à la bordure urbanisée
- la part de cellules bâties situées à moins de 5 m. de la bordure urbanisée

Tous les calculs de distance sont effectués sur le réseau de voirie. Nous travaillons uniquement sur le réseau routier pour calculer les distances aux commerces et services. En revanche, pour calculer la distance à la bordure urbanisée, nous travaillons sur le réseau routier complété de celui des sentiers et chemins.

La bordure urbanisée d'une agglomération est définie selon la méthodologie décrite dans [Tannier et al., à paraître]. Une explication simplifiée de cette méthodologie est donnée dans [Tannier, 2009a]. La méthode consiste d'une part, à déterminer un seuil de distance marquant la limite de l'agglomération morphologique, et d'autre part, à cartographier cette limite via l'application, à l'ensemble des cellules urbanisées, d'un buffer positif suivi d'un buffer négatif correspondant au seuil de distance précédemment identifié. Ce faisant, l'emprise spatiale de la bordure urbaine varie pour chaque scénario. Les distances à la bordure urbanisée ne peuvent donc pas être directement comparées ; seuls des taux d'évolution doivent être considérés.

L'urbanisation de nouvelles cellules sur la zone étudiée peut modifier la valeur du seuil de distance marquant la limite de l'agglomération morphologique, et ce d'autant plus que le développement urbain est important (i.e. valeurs élevées de N_{max}). Cependant, comme il serait très long de recalculer un seuil de distance pour chaque scénario, le seuil de distance retenu est celui définissant l'agglomération morphologique actuelle.

Méthodes complémentaires pour analyser la morphologie des réseaux : analyse du plus court chemin et analyse de connectivité

Méthodologie

En physique, différents types d'analyses fractales ont été introduites pour mettre en évidence la connectivité entre particules qui contribuent au transport du courant électrique dans un semi-conducteur. Il est connu que la répartition des particules connectées dans les corps solides en question suit une loi de distribution hiérarchique telle qu'on la connaît dans des fractales, par exemple dans les tamis de Sierpinski.

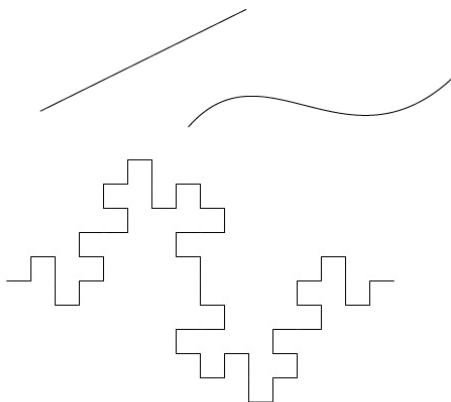
Les propriétés topologiques ainsi considérées sont aussi intéressantes dans le contexte des réseaux de transport, notamment si on considère le réseau routier à l'échelle d'une agglomération où l'on peut s'attendre à une répartition non uniforme des branches du réseau avec des zones de forte et de faible densité. Rappelons que dans notre concept de base nous avons mis en avant qu'une densification des réseaux accompagnée d'une trop grande connectivité sont susceptibles d'encourager l'utilisation de la voiture. C'est pourquoi les analyses développées permettent de mettre en évidence la couverture d'un espace par un réseau mais aussi sa connectivité.

Les analyses sont réalisées pour une zone choisie. Trois propriétés topologiques du réseau sont considérées que nous illustrons en nous référant à un réseau routier :

- la dimension fractale D_n du réseau nous informe sur la répartition de l'ensemble des branches dans la zone d'étude, qui sont connectées et qui se trouvent entre deux points situés sur le réseau. Ce réseau comprend donc aussi des voies en cul de sac qui servent uniquement à une desserte locale et ne contribuent pas à la connectivité du réseau.
- la dimension fractale de l'ensemble des branches qui relient directement les deux points, qui forment donc des boucles que nous appelons dimension de connectivité D_c . Celle-ci analyse de quelle manière l'ensemble des branches reliant deux points donnés couvrent l'espace.
- la dimension fractale du plus court chemin D_b entre deux points sectionnés (en anglais, « backbone dimension ») [Stanley, 1986]. Il s'agit d'une dimension « dorsale » qui indique si le chemin direct entre deux points donnés est plus ou moins tortueux.

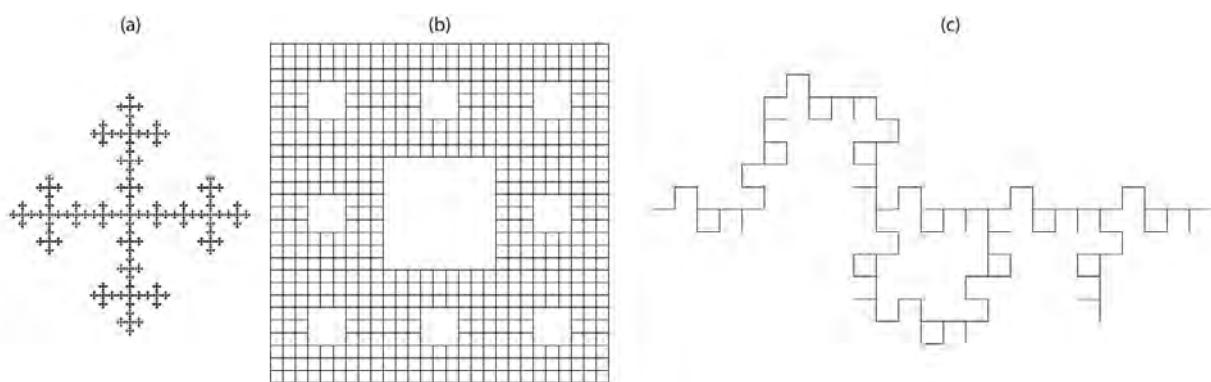
Rappelons que pour un réseau connecté la valeur 1 de la dimension fractale indique que le réseau est linéaire et non-ramifié, il peut être en courbe mais pas sinueux à travers les échelles (figure 11 en haut) tandis qu'un réseau fractal se caractérise par une sinuosité à travers les échelles (figure 11 en bas)

Figure 11. En haut, deux structures linéaires dont la dimension fractale est égale à 1. En bas, une structure linéaire dont la dimension fractale est supérieure à 1



Nous illustrons l'information obtenue à travers l'exemple de deux tamis de Sierpinski qui représentent des cas extrêmes d'un point de vue topologique, ainsi qu'un réseau fractal construit qui est tortueux, contient des boucles et des cul de sac. Le réseau de la figure 12 (a) ne contient aucune boucle et les branches du réseau sont rectilignes. Ainsi la dimension du plus court chemin D_b est égale à 1 et la dimension de connectivité D_c a la même valeur. En revanche, la dimension du réseau prend aussi en compte les embranchements et est ainsi $D_n = 1,46$. Le plus court chemin du réseau de la figure 12 (b) est également rectiligne donc $D_b = 1$, en revanche le réseau est entièrement connectif et ne contient aucun élément en cul de sac. Ainsi $D_n = D_c = 1,89$. Pour le réseau (c) les trois dimensions sont différentes. Le plus court chemin a une dimension de $D_b = 1,2$, pour la dimension de connectivité on obtient $D_c = 1,43$ et la dimension totale du réseau est $D_n = 1,49$.

Figure 12. (a) Tamis de Sierpinski avec boucles et « culs de sac » (b) Tamis de Sierpinski avec boucles mais sans « culs de sac » et (c) Réseau fractal tortueux avec boucles et « culs de sac »



Les trois types d'analyse ont été implantés dans une nouvelle version du logiciel Fractalyse qui est basée sur l'utilisation de données vectorielles. Rappelons qu'à l'heure actuelle le logiciel Fractalyse se sert d'une logique matricielle du type « raster » pour effectuer les calculs. Ce type de codage est habituellement utilisé en imagerie. Cependant, compte-tenu du nombre croissant de données vectorielles issues de base de données SIG, nous avons prévu d'adapter progressivement le logiciel Fractalyse à ce type de données.

Il paraît évident que le choix de la zone d'étude est susceptible d'influencer les résultats au moins en ce qui concerne la connectivité des branches du réseau. En effet en élargissant la zone d'étude, des tronçons situés en bordure de la zone peuvent apparaître comme des voies en cul de sac bien qu'ils soient connectés au réseau à une plus grande distance. D'un point de vue de la géométrie fractale la taille de la fenêtre ne devrait pas intervenir si la structure considérée est véritablement fractale car, due à l'auto-similarité, l'agrandissement de la fenêtre ne modifie pas le comportement fractal de la structure. Cependant, comme les structures observées ne correspondent jamais à une structure fractale parfaite, une telle influence n'est pas à écarter. On peut faire l'hypothèse que des détours dont la longueur dépasse un certain seuil sont sans intérêt car, quel que soit le mode de déplacement adopté, un trajet qui génère une trop grande perte de temps ne sera pas accepté par l'usager. Notons toutefois que le logiciel développé ne permet pas encore de choisir une autre forme qu'un carré pour sélectionner la zone d'étude.

Il existe différents algorithmes pour déterminer la dimension fractale. Deux types d'algorithmes ont été implémentés pour mesurer les propriétés topologiques précitées :

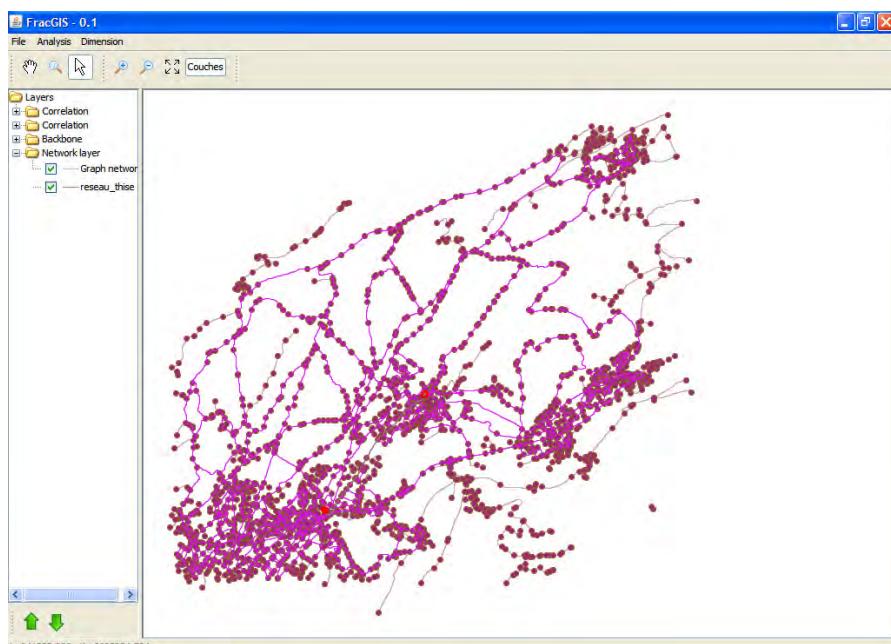
- l'analyse de boites qui est le type d'analyse le plus courant. Cette analyse suit la procédure utilisée pour la décomposition fractale. On couvre la zone d'étude d'une grille dont on fait varier la taille des mailles. A chaque étape, on identifie le nombre de mailles qui contiennent des branches du réseau. La relation entre

le nombre de mailles qui contiennent des branches du réseau et la taille de la maille sert à estimer la dimension fractale du réseau.

- l'analyse de corrélation se réfère à une logique différente. On détermine pour chaque point faisant partie du réseau la longueur des branches qui se trouvent à une distance inférieure à une valeur donnée ε et on calcule la moyenne des longueurs de branches. On fait ensuite varier la valeur ε . A partir de la relation entre les longueurs moyennes et les valeurs ε , on détermine la dimension fractale.

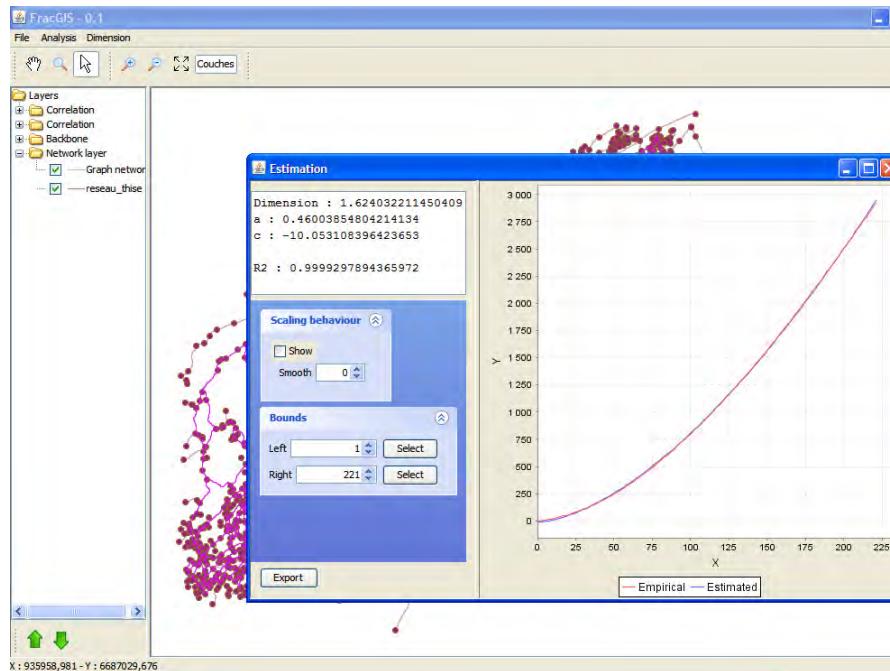
Exemple d'application

Nous illustrons l'application de ce concept de mesure à un réseau réel pour une commune située à l'Est de Besançon et qui se trouve à environ 3 km d'un centre commercial du niveau 2. Nous avons effectué l'analyse du réseau routier en choisissant un point situé au cœur du village périurbain et l'autre point à l'entrée de la zone commerciale (en rouge sur la copie d'écran ci-dessous). Les dimensions ont été estimées selon l'analyse corrélation.



L'image ci-dessus présente le réseau routier. Les tronçons sont rectilignes entre les points indiqués. Les trajets étudiés se trouvent entre les deux points marqués en rouge. Le chemin le plus court est représenté en marron, les branches connectées en violet.

L'image suivante montre l'affichage de la courbe de l'analyse de connectivité et les indications sur l'estimation de la dimension fractale.



Nous obtenons les valeurs suivantes :

D_n	1,63
D_b	1,0
D_c	1,62

La valeur $D_b = 1$ exprime que le plus court chemin n'est pas sujet à des détours importants. En revanche la valeur de $D_c = 1,62$ indique que le réseau contient des boucles mais couvre l'espace de façon inégale. Ces boucles sont donc concentrées à certains endroits. De fait, pour l'espace qui sépare le village du centre commercial, le réseau est peu développé par rapport aux zones construites. Comme $D_b \approx D_t$, les voies en cul de sac n'ajoutent pas d'éléments importants par rapport à la couverture de l'espace par le réseau.

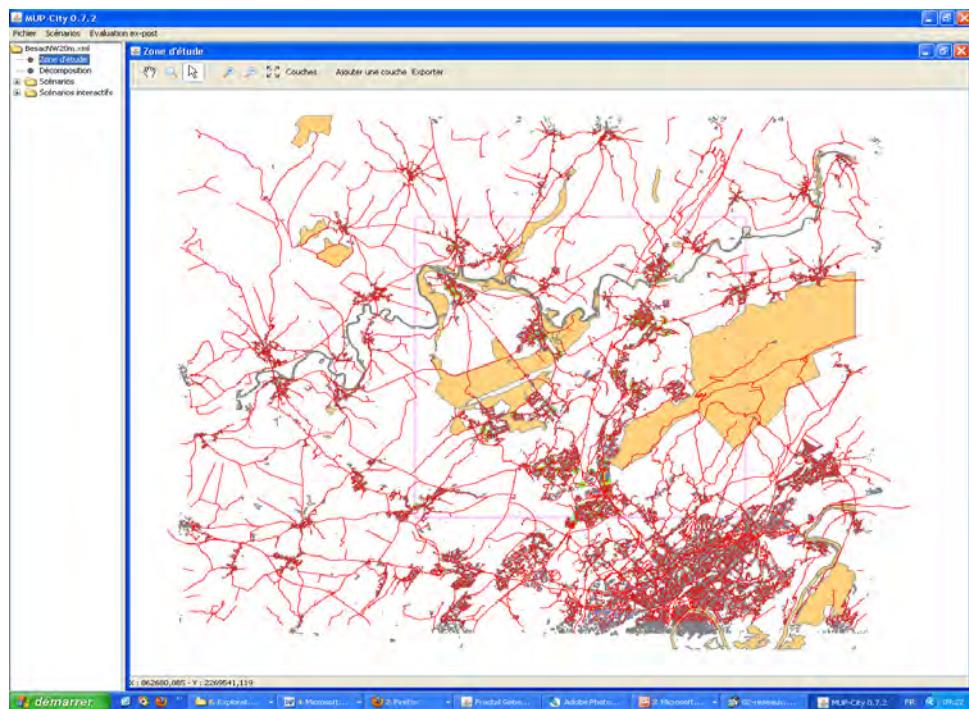
Automatisation de l'analyse d'accès

Dans le projet initial [Frankhauser et al., 2007a], deux méthodes d'analyse fractale, l'analyse d'accessibilité et l'analyse d'accès (anciennement dénommée « analyse de desserte »), ont été utilisées pour évaluer l'accessibilité aux services et commerces. Ces méthodes sont basées sur une logique fractale radio-concentrique conformément aux réflexions conceptuelles du projet initial. La comparaison des résultats obtenus par les deux méthodes permet de mettre en évidence la plus ou moins bonne localisation d'un service par rapport à son accessibilité par le réseau, mais aussi d'identifier des zones de développement potentiel compte tenu de leur bonne accessibilité aux services. Comme prévu dans le présent projet, l'analyse d'accès, non-automatisée au départ, a été intégrée dans la nouvelle version du logiciel Fractalyse.

Utilisation interactive de MUP-City pour l'aménagement urbain

Pour l'aménageur, l'urbaniste ou le décideur qui souhaite mettre en place des scénarios de développement pour un espace donné, les modèles de simulation qui génèrent des configurations spatiales « toutes faites » ne sont pas toujours satisfaisants. En effet, il est souvent difficile de se représenter l'ensemble des hypothèses sous-jacentes de la modélisation et leur impact sur les processus qui génèrent les scénarios. Par ailleurs, les outils de dessin assisté par ordinateur ne fournissent pas d'orientations conceptuelles particulières à l'utilisateur. L'intérêt de la version interactive de MUP-city réside dans la possibilité de pouvoir développer des scénarios d'aménagement pas-à-pas, de manière interactive, laissant ainsi une liberté de décision à l'utilisateur pour le choix des sites qu'il souhaite urbaniser ou non.

Pour développer les scénarios, l'utilisateur dispose d'une représentation cartographique de la zone d'étude pour laquelle il peut choisir les couches d'information qu'il souhaite afficher, c'est-à-dire une couche contenant les bâtiments, une représentation des réseaux, la localisation des commerces et services, les éléments paysagers protégés (forêts, réserves naturelles, zones inondables, cours d'eau...). D'autres couches (par exemple la topographie sous forme de courbes de niveau) peuvent être intégrées par la suite. L'utilisateur peut aussi introduire une couche d'information contenant des projets futurs d'aménagement tels que la localisation de nouveaux services ou commerces dans la zone d'étude. Ceci lui permet de comparer des scénarios développés sur le logiciel à partir de la situation actuelle à des scénarios qui correspondent à une autre situation future.



La démarche suivie par l'utilisateur pour concevoir des scénarios de développement correspond directement à la logique fractale et se distingue donc fondamentalement de la manière utilisée habituellement en aménagement du territoire. En effet, l'utilisateur procède par étapes en passant d'un niveau d'analyse grossier, qui correspond l'échelle de l'ensemble de la zone d'étude, à un niveau d'analyse très fin qui se situe à l'échelle des parcelles. Le support pour ce passage est la grille régulière carrée utilisée pour la décomposition fractale de la surface bâtie. En passant d'une étape à la suivante, chaque maille de la grille est ainsi

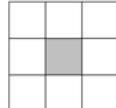
décomposée en cellules plus petites. Le logiciel identifie les cellules qui contiennent déjà du bâti. Des cellules vides peuvent être converties en cellules constructibles. Cependant le nombre maximum de cellules constructibles dans chaque maille est strictement contraint par la règle fractale choisie, soit le nombre N_{max} . Si ce nombre est atteint ou déjà dépassé, aucune autre cellule ne peut être construite et un message d'erreur s'affiche.



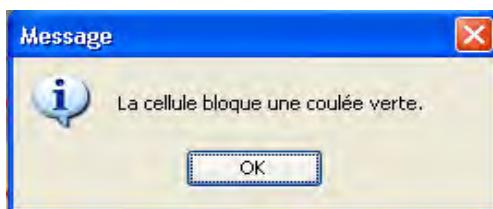
De même, une cellule faisant partie d'une maille qui n'a pas été identifié comme contenant du bâti, ou qui n'a pas été déclarée constructible à une étape précédente, ne pourra jamais être convertie en cellule constructible.

S'ajoutent aux contraintes issues de la logique fractale deux autres règles morphologiques impératives qui se réfèrent au voisinage d'une cellule choisie. Ce voisinage prend en compte les huit cellules voisines à la cellule considérée (voisinage de Moore, figure 13).

Figure 13. Voisinage de Moore



La première règle exige qu'une cellule bâtie soit voisine d'au moins une cellule non-bâtie. Si ceci n'est pas le cas, un message d'erreur s'affiche à l'écran. La deuxième règle correspond à la fonctionnalité de préserver des coulées vertes : une cellule non-construite ne doit pas être isolée d'autres cellules non-construites. Dans ce but, le logiciel vérifie si l'urbanisation d'une cellule amène à la séparation d'un agrégat de cellules non-bâties en deux agrégats, suite à l'urbanisation de la cellule. Si tel est le cas, la cellule ne peut être urbanisée et un message d'erreur s'affiche⁴.

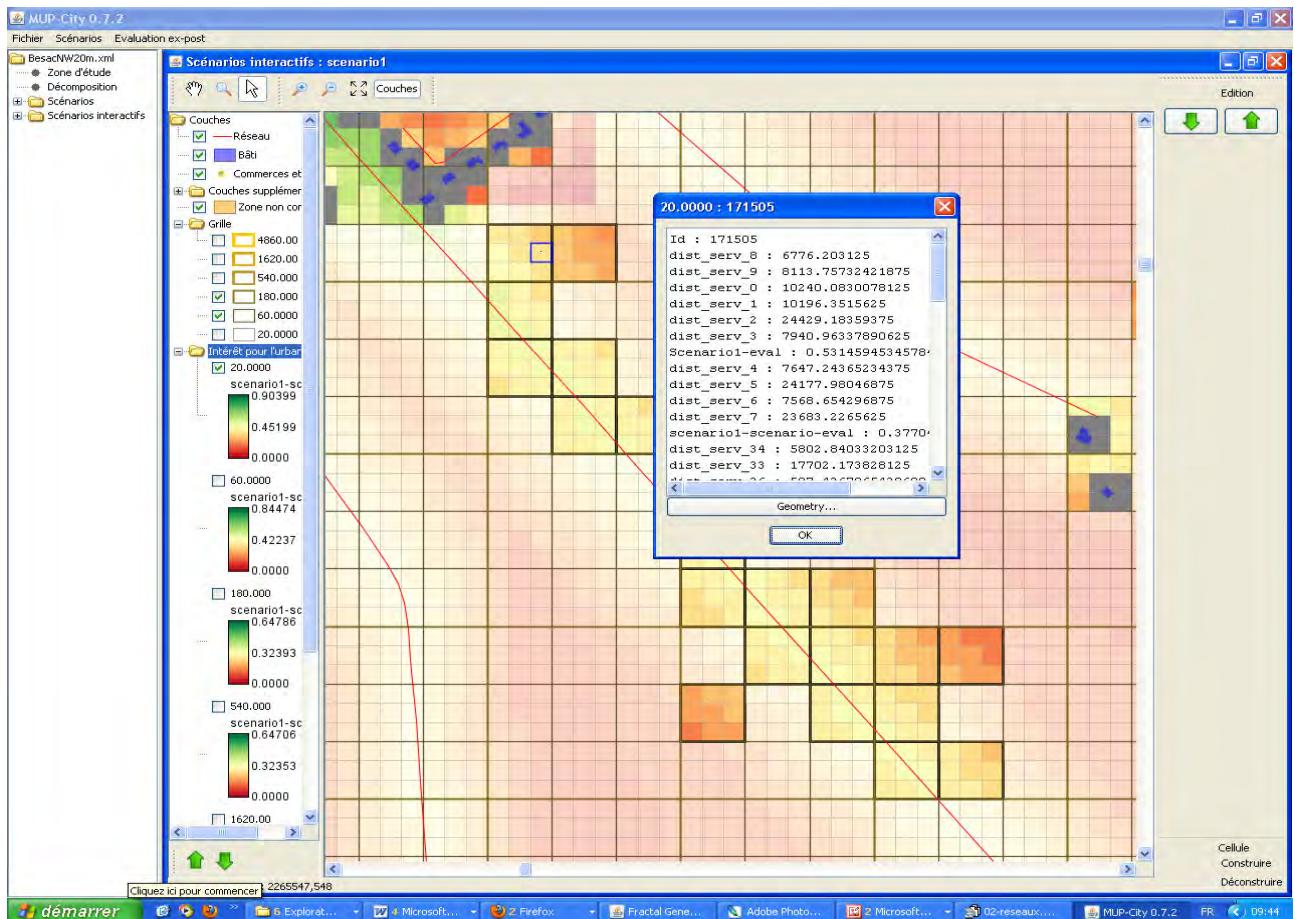


Il est évident que les cellules qui se situent dans une zone d'éléments paysagers protégés sont également exclus d'une urbanisation ultérieure.

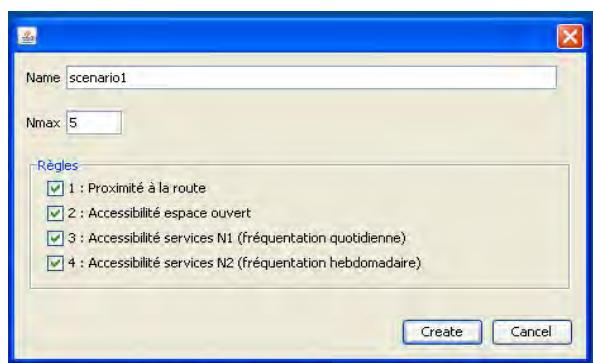
Outre les règles décrites qui agissent directement comme contraintes, l'utilisateur dispose pour chaque étape de décomposition d'une évaluation pour chaque cellule qui lui indique à quel point celle-ci se prête à un développement résidentiel. Dans cette évaluation peuvent actuellement être intégrées les accessibilités aux agrégats de service et commerces du niveaux 1 et 2, la distance au réseau de route existant ainsi que les caractéristiques de l'environnement résidentiel. Ce critère prend en compte l'accès direct de la cellule aux espaces ouverts en évitant, toutefois, la fragmentation des espaces bâties et non bâties.

⁴ Le comptage des agrégats non bâties, qui sert de base à la fonctionnalité de préservation des coulées vertes, est effectué à la volée.

Ces informations sont synthétisées et figurent dans la représentation cartographique sous forme d'une couleur attribuée à chaque cellule. Le dégradé de couleurs couvre la gamme entre un rouge foncé (faible intérêt à être urbanisée) et un vert foncé (fort intérêt à être urbanisée). Soulignons que cette fois-ci l'utilisateur n'est pas contraint à choisir une cellule qui est bien évaluée. Pour plus d'information il peut afficher les détails de l'évaluation dans un tableau qui donne des indications sur les distances réelles aux différents agrégats commerciaux du niveau 1 et 2, la distance au réseau routier existant, ainsi que la valeur qui synthétise ces informations.

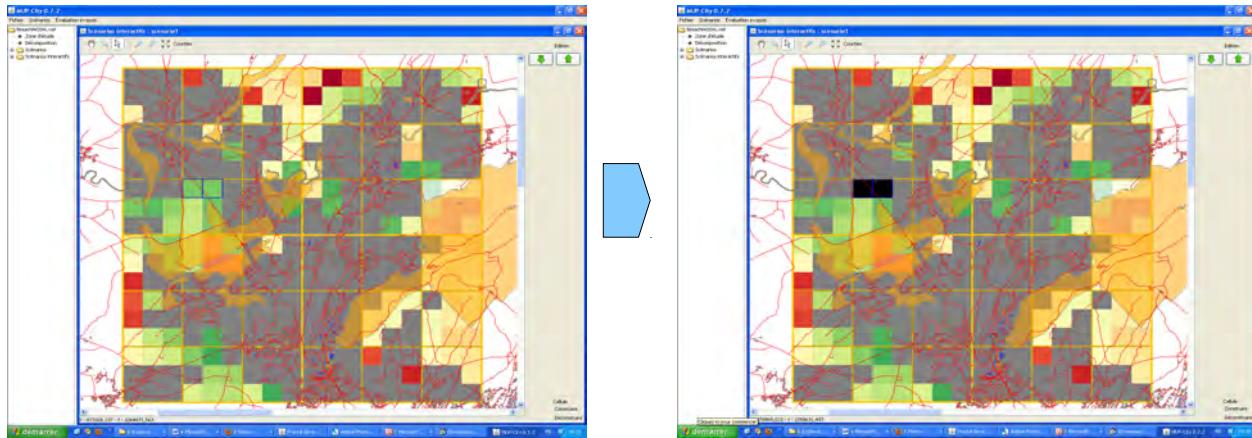


Au début de l'élaboration d'un scénario, l'utilisateur aura à choisir la dimension fractale à travers la valeur N_{max} ainsi que les différentes règles d'évaluation qu'il souhaite prendre en compte.



Afin de faciliter le développement de scénarios, les mailles qui ne contiennent pas de cellules construites à l'échelle d'analyse supérieure, sont représentées par des couleurs pâles. Rappelons que ces cellules ne doivent pas être urbanisées selon la règle d'urbanisation fractale. Inversement, les mailles contenant des cellules de couleur vive sont construites à l'échelle d'analyse supérieure et donc ouvertes à l'urbanisation.

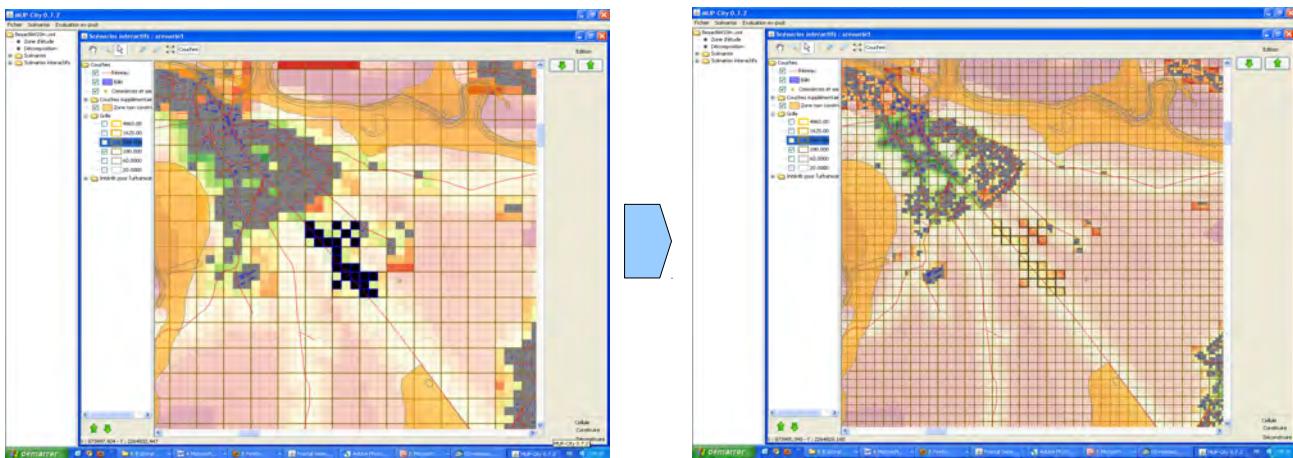
Après avoir sélectionné une ou plusieurs cellules pour une future urbanisation, l'utilisateur valide sa sélection ; les cellules passent alors en couleur noire.



Cellules de couleur pâle : non-urbanisables ; cellules de couleur vive : urbanisables ; cellules de couleur noire : urbanisation simulée

La fonctionnalité « déconstruire » permet par ailleurs de supprimer une cellule construite.

L'utilisateur passe ensuite à l'étape suivante et travaille donc sur un maillage de l'espace plus fin. En passant ainsi à un découpage plus fin, ceci permet de faire un zoom sur une zone particulière. Les cellules qui ont été sélectionnées à l'étape précédente se distinguent visuellement et correspondent désormais à des mailles à cette échelle d'analyse plus fine. L'utilisateur peut choisir à l'intérieur de ces mailles les cellules qu'il souhaite urbaniser.



Pour éventuellement modifier le choix effectué lors d'une étape précédente, il est possible de revenir à une échelle d'analyse plus grossière et de supprimer ou d'ajouter des cellules urbanisées. Le passage d'une échelle à la suivante ou à la précédente se fait en utilisant les deux flèches vertes figurant en haut à droite des copies d'écran. Notons qu'après chaque modification de la configuration spatiale (ajout ou suppression de cellules urbanisées), le logiciel procède à une réévaluation de l'ensemble des cellules. Il est donc possible que les couleurs affichées et les indications dans les tableaux d'évaluation changent pour certaines cellules.

DEUXIÈME PARTIE

Applications de MUP-City

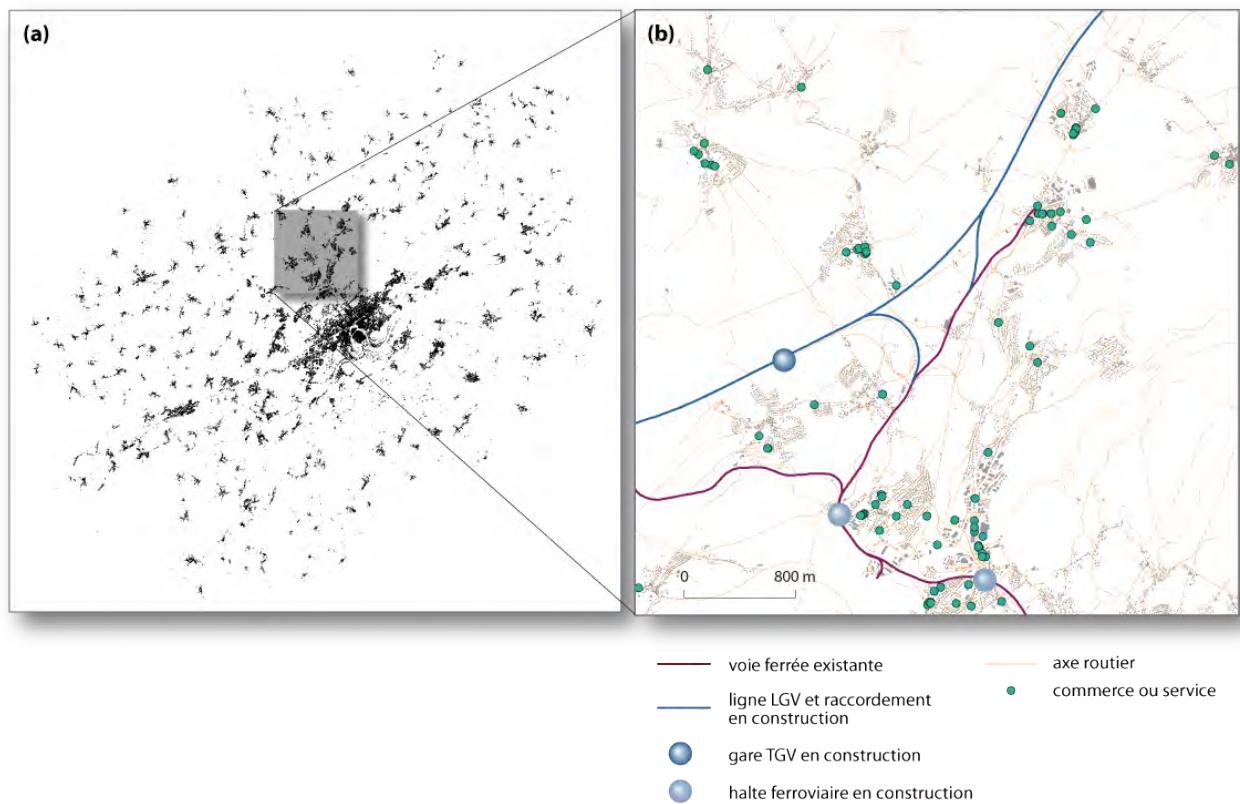
Cinq séries de scénarios

Cinq séries de scénarios ont été créées avec MUP-City, et analysées :

- 64 scénarios théoriques pour évaluer la stabilité et la robustesse du modèle ;
- 16 scénarios théoriques pour comparer les performances respectives de scénarios d'urbanisation multi- et mono-échelles ;
- 5 scénarios réalistes pour tester l'utilité de MUP-City pour l'aménagement urbain ;
- 20 scénarios réalistes visant à améliorer l'accessibilité aux commerces et services en jouant sur différentes règles fractales et en modifiant l'armature commerciale de la zone d'étude ;
- 36 scénarios réalistes dans le cadre d'une étude expérimentale pour l'élaboration des Plans locaux d'urbanisme des quatre communes riveraines de la future gare TGV de Besançon-Auxon.

La zone d'étude est située au Nord de l'agglomération de Besançon, agglomération de l'Est de la France comptant environ 140 000 habitants (Figure 14). Il s'agit d'un secteur périurbain de 14 000 habitants, distant du centre ville d'environ 15 minutes en voiture. Le secteur est traversé par la future ligne ferroviaire à grande vitesse Rhin-Rhône, actuellement en cours de construction. L'échelle d'analyse est locale. On considère que l'accessibilité spatiale aux lieux d'emploi et aux commerces et services de fréquentation potentielle mensuelle ou plus rare est équivalente pour tous les résidents du secteur.

Figure 14. (a) Bâti de l'aire urbaine de Besançon. (b) Le secteur périurbain Nord



Les cinq séries de scénarios ont été simulées conjointement au développement du logiciel MUP-City. Ainsi les simulations ont été réalisées avec MUP-City 0.1 à 0.3 et la version actuelle du logiciel est MUP-City 0.7. De ce fait, la simulation des différentes séries de scénarios n'a mobilisé que quelques fonctionnalités du

logiciel existant à l'heure actuelle, et non toutes. En particulier, les zones non constructibles n'ont pas été prises en compte dans les quatre première séries de scénarios. Elles l'ont été dans la cinquième série, mais uniquement *a posteriori*, en supprimant les cellules bâties situées dans des zones non constructibles. Par ailleurs, les évaluations ex-post de l'accessibilité aux commerces et services et aux espaces ouverts n'ont pas été effectuées avec MUP-City. Elles ont été faites en-dehors de MUP-City, en utilisant les logiciels de système d'information géographique GRASS et ArcGIS. Les fonctionnalités de mesure morphologique des réseaux développées dans Fractalyse n'ont pas été utilisées. Enfin, la fonctionnalité de MUP-City permettant de fixer un seuil minimal de densité en-deçà duquel une maille est considérée comme étant non urbanisée n'a pas non plus été utilisée.

Les trois séries de scénarios réalistes sont le fruit d'une collaboration avec l'AUDAB (Agence d'urbanisme de l'agglomération de Besançon) et la CAGB (Communauté d'agglomération du Grand Besançon). Outre la mise à disposition de données et d'informations par ces deux structures, nous avons travaillé deux demi-journées avec l'AUDAB pour définir les deux premières séries de scénarios réalistes (29 octobre 2008, 5 février 2009). Nous avons présenté les résultats obtenus à la CAGB le 3 juillet 2009 et à l'AUDAB le 11 septembre 2009. Vu les résultats obtenus, la CAGB a ensuite souhaité étudier la possibilité d'intégrer des projets d'aménagement fractals dans les Plans Locaux d'Urbanisme. Ceci a donné lieu à l'étude sur les quatre communes riveraines de la future gare TGV de Besançon-Auxon (troisième série de scénarios réalistes).

64 scénarios théoriques pour évaluer la stabilité et la robustesse du modèle

Ces analyses ont été publiées dans : TANNIER C., VUIDEL G., FRANKHAUSER P., HOUOT H. (2010), Simulation fractale d'urbanisation - MUP-city, un modèle multi-échelle pour localiser de nouvelles implantations résidentielles, *Revue internationale de géomatique*, 20(3), 303-329.

Sur un même espace (11 communes de la zone d'étude), 64 scénarios d'aménagement ont été créés, qui n'intègrent pas de contraintes environnementales ou urbanistiques (pentes, plans locaux d'urbanisme...). Ils varient en fonction des paramètres suivants :

- la taille de la cellule à la dernière étape de la décomposition multi-échelle (entre 50 et 20 m.) ;
- la taille du périmètre étudié qui dépend de la taille de la cellule à la dernière étape de la décomposition multi-échelle ;
- le nombre maximal N_{max} de cellules pouvant être urbanisées par maille (N_{max} compris entre 4 et 7), le facteur de réduction r étant fixé à 1/3 ;
- l'application des règles d'accessibilité selon une version « basique » et « stricte ». Dans le premier cas, toute cellule appartenant à une maille bâtie est urbanisable à un niveau d'analyse plus fin. Dans le deuxième cas, quand à un niveau d'analyse l_i le nombre N_{obs} de cellules bâties dans une maille est supérieur à N_{max} , seules les N_{max} cellules caractérisées par les meilleures valeurs d'évaluation peuvent être urbanisées au niveau d'analyse inférieur l_{i+1} .

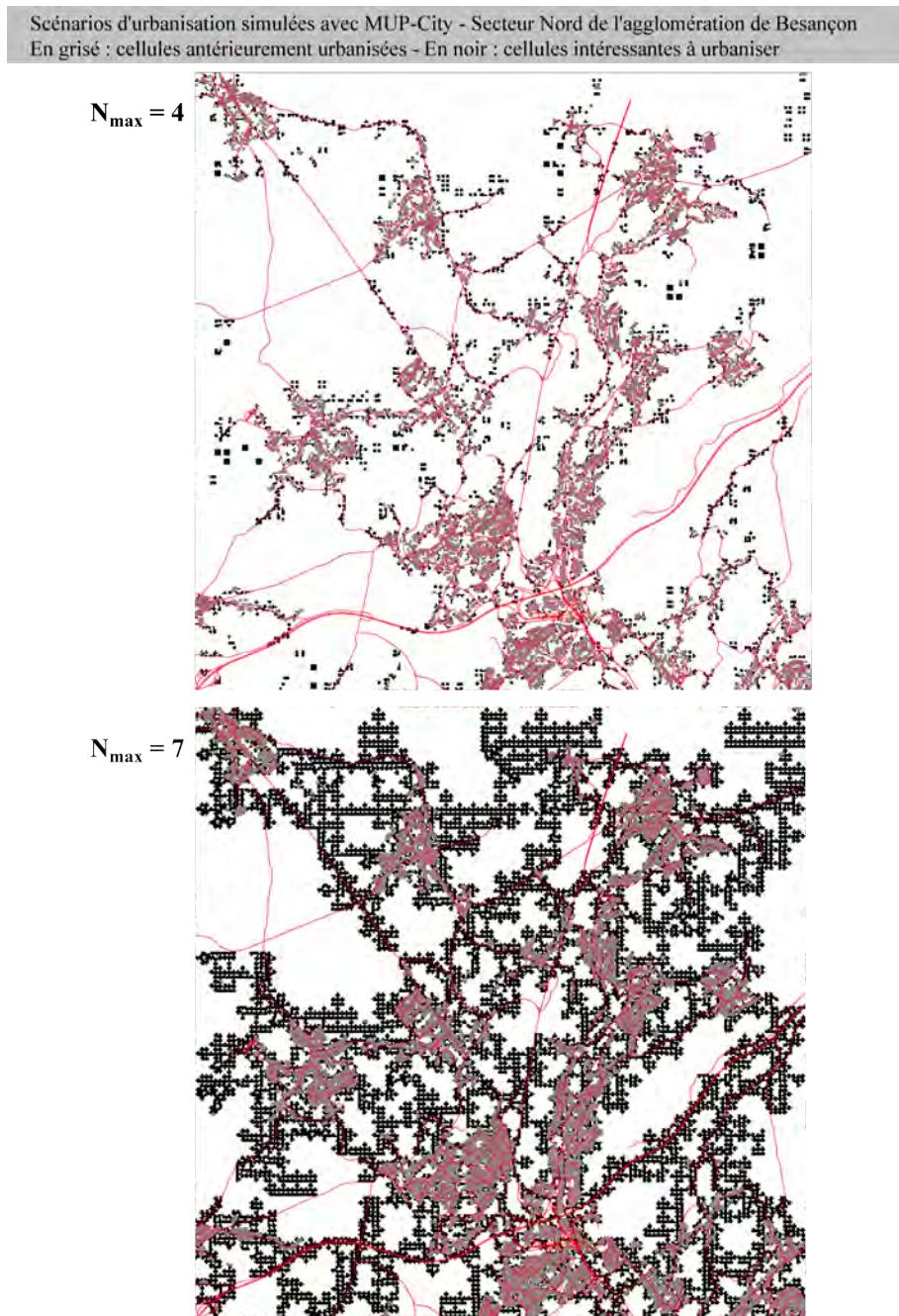
Tableau 3. Variation du nombre de cellules bâties et simulées pour deux scénarios

Description du scénario	Nombre de cellules initialement bâties	Nombre de cellules intéressantes à urbaniser	Ratio
$N_{max} = 4$ - Version « stricte » Taille minimale de la cellule : 50 m.	4 474	1 128	0,27
$N_{max} = 7$ - Version « basique » Taille minimale de la cellule : 20 m.	14 928	52 990	3,55

Les 64 scénarios testés montrent la stabilité du modèle. Le modèle n'apparaît pas sensible au positionnement de la grille de décomposition : les résultats obtenus ne changent pas fondamentalement si celle-ci varie. Les variations des résultats sont en cohérence avec les variations des paramètres qui ont été testés (N_{max} et taille minimale de la cellule) (tableau 3). Le rapport entre le nombre de cellules intéressantes à urbaniser et le nombre de cellules initialement urbanisées diminue avec la taille de la cellule à la dernière étape de la décomposition, ce qui est cohérent avec la logique multiplicative selon laquelle fonctionne la règle fractale d'urbanisation.

La figure 15 présente deux exemples de tissus bâties obtenus sur la base de la décomposition multi-échelle à 20 m. Les scénarios générés ne sont pas forcément réalistes, mais sont utiles pour tester la stabilité du modèle. Pour le scénario $N_{max} = 4$, les extensions urbaines simulées ne dénaturent pas le tissu bâti originel. Le scénario $N_{max} = 7$ simule, lui, un développement urbain beaucoup plus important : plus des deux tiers de l'espace sont urbanisés ou potentiellement urbanisables. Pourtant, même dans ce cas, les espaces libres suivent une organisation spatiale hiérarchique et demeurent largement connectés.

Figure 15. Exemples de résultats obtenus avec MUP-City 0.3 — Source : TANNIER C., VUIDEL G., FRANKHAUSER P., HOUOT H. (2010), Simulation fractale d'urbanisation - MUP-city, un modèle multi-échelle pour localiser de nouvelles implantations résidentielles, *Revue internationale de géomatique*, 20(3), 303-329.



16 scénarios théoriques pour comparer les performances respectives de scénarios d'urbanisation multi- et mono-échelles

Ces analyses ont été publiées dans : TANNIER C., VUIDEL G., FRANKHAUSER P., HOUOT H. (2010), Simulation fractale d'urbanisation - MUP-city, un modèle multi-échelle pour localiser de nouvelles implantations résidentielles, *Revue internationale de géomatique*, 20(3), 303-329.

L'étude de modèles théoriques de villes, fractales (téragone, tapis de Sierpinski) et non fractales (ville uniforme, ville compacte), a montré que les modèles fractals étaient plus performants en terme d'accessibilité aux aménités rurales et moins performants en terme d'accessibilité aux aménités urbaines [Frankhauser, 2000; Frankhauser, 2004; Frankhauser & Genre-Grandpierre, 1998]. Cependant, le différentiel négatif d'accessibilité aux aménités urbaines calculé pour les modèles fractals était sur-compensé par le différentiel positif d'accessibilité aux aménités rurales. Nous cherchons maintenant à confirmer ou infirmer ces résultats en étudiant différentes configurations spatiales générées à partir d'un tissu bâti réel grâce à l'application MUP-City.

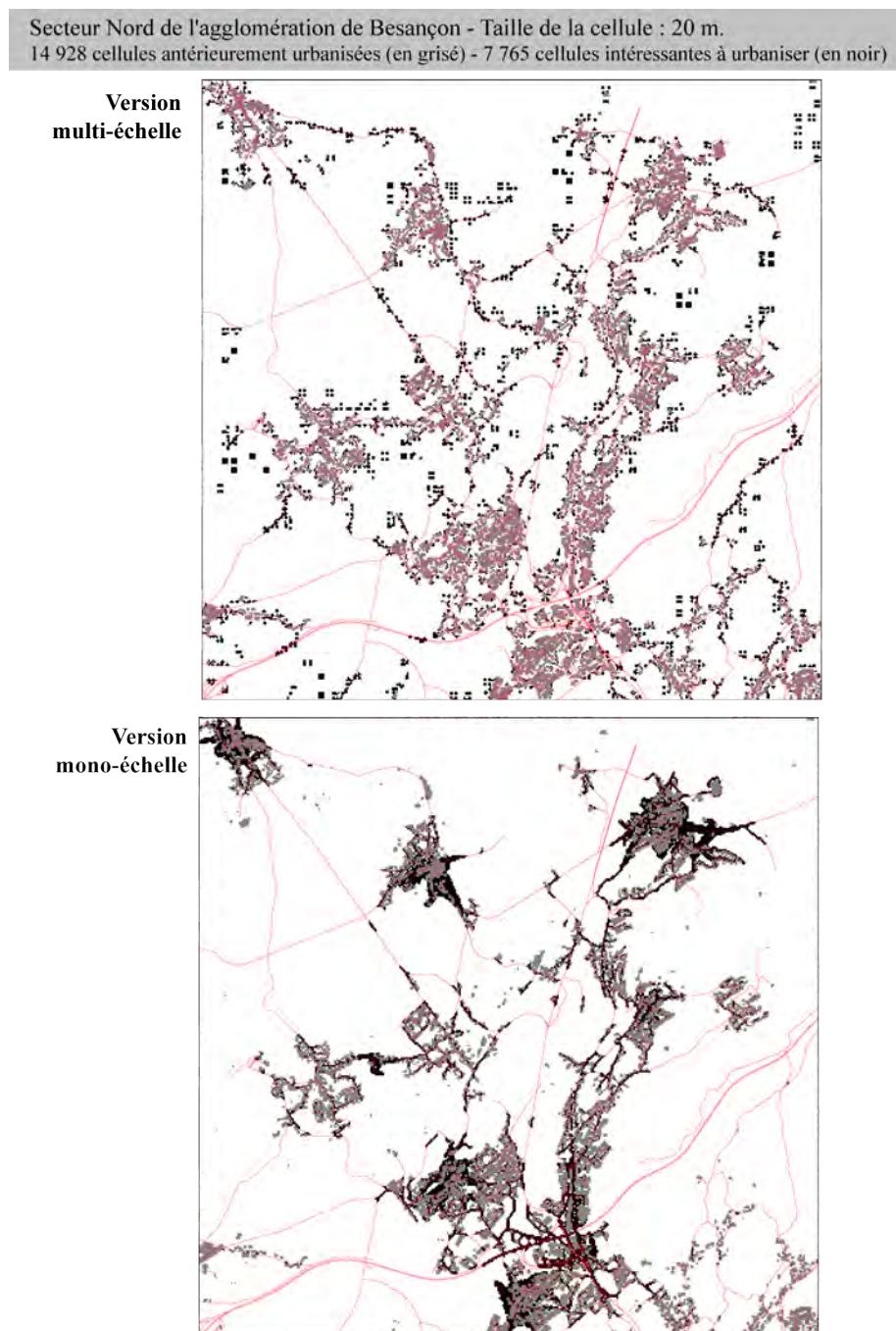
Seize scénarios d'aménagement ont été comparés. Huit d'entre eux sont multi-échelles (N_{max} est égal à 4, 5, 6 ou 7 ; la taille de la cellule à la dernière étape de décomposition est égale à 20 ou 50 m.). Les huit autres scénarios sont le pendant mono-échelle de chacun des scénarios multi-échelles. Pour créer ces scénarios mono-échelles avec MUP-City, le modèle fractal multi-échelle n'a pas été activé. Seules les règles d'accessibilité ont été appliquées et ce, uniquement à la dernière étape de décomposition, sur une grille de cellules de 20 ou 50 m. de côté. Le nombre de cellules intéressantes à urbaniser a été fixé a priori ; il s'agit du nombre de cellules intéressantes à urbaniser identifié par MUP-City pour chacun des scénarios multi-échelles correspondant (tableau 4).

Tableau 4. Variation du nombre de cellules bâties selon les scénarios

Taille minimale de cellule	Nombre de cellules initialement bâties	N_{max}	Nombre de cellules intéressantes à urbaniser
50	4 474	4	1 774
		5	3 273
		6	5 611
		7	8 951
20	14 928	4	7 765
		5	15 950
		6	30 474
		7	52 990

La figure 16 présente un exemple de scénario d'urbanisation multi-échelle pour une taille de cellule égale à 20 m., et le scénario mono-échelle correspondant.

Figure 16. Exemple de résultats obtenus avec MUP-City 0.3 — Source : TANNIER C., VUIDEL G., FRANKHAUSER P., HOUOT H. (2010), Simulation fractale d'urbanisation - MUP-city, un modèle multi-échelle pour localiser de nouvelles implantations résidentielles, *Revue internationale de géomatique*, 20(3), 303-329.



Accessibilité aux commerces et services

L'accessibilité a été évaluée à travers la mesure de la distance moyenne sur le réseau de chaque cellule bâtie au centre de commerces et services le plus proche. Les résultats obtenus sont à chaque fois nettement meilleurs pour les versions mono-échelles que pour les versions multi-échelles d'un même scénario (tableau 5).

Tableau 5. Distance moyenne au centre de commerces et services la plus proche (en m.)

Taille minimale de la cellule (en m.)	N _{max}	Centres de fréquentation quotidienne		Centres de fréquentation hebdomadaire	
		scénarios mono-échelle	scénarios multi-échelle	scénarios mono-échelle	scénarios multi-échelle
50	4	1 189	1 419	1 025	1 265
50	5	1 258	1 537	1 064	1 392
50	6	1 348	1 674	1 191	1 541
50	7	1 504	1 821	1 352	1 701
20	4	957	1 302	831	1 157
20	5	1 067	1 420	931	1 277
20	6	1 226	1 552	1 076	1 423
20	7	1 469	1 711	1 321	1 589

Deux phénomènes permettent d'expliquer la moindre performance des scénarios multi-échelles en terme d'accessibilité aux centres de commerces et services. D'une part, la règle fractale d'urbanisation impose d'urbaniser dans toutes les mailles où existe au moins un bâtiment. Ce faisant, le modèle identifie des cellules intéressantes à urbaniser dans des zones quasiment vides et éloignées de tout centre de commerces et services. L'application de la fonctionnalité permettant de restreindre le nombre de mailles potentiellement urbanisables en fonction de la densité de bâtiments présents par maille serait ici intéressante à tester. D'autre part, le modèle fractal sur lequel est basé MUP-City suppose de localiser les commerces et services en des lieux où se concentre le bâti, en affectant des centres de commerces et services d'autant plus importants que la concentration de bâti est localement importante. Or, sur le secteur Nord de l'agglomération de Besançon, l'organisation spatiale des commerces et services est assez chaotique et ne suit pas une telle logique. Il serait donc intéressant de mesurer l'impact d'une relocalisation des commerces et services sur la distance moyenne aux centres de commerces et services. Ceci permettrait d'ailleurs d'expliquer pourquoi la différence entre scénarios multi- et mono-échelles en terme d'accessibilité aux centres de commerces et services est moins importante dans le cas des centres de fréquentation quotidienne que des centres de fréquentation hebdomadaire.

Accessibilité aux espaces ouverts

Cette accessibilité est évaluée à travers le nombre de cellules bâties directement contiguës à au moins une cellule non bâtie. Pour ce critère d'évaluation, le modèle multi-échelle est nettement plus performant que le modèle mono-échelle (tableau 6). La différence entre les deux modèles augmente quand le nombre de cellules bâties augmente.

Tableau 6. Accessibilité aux espaces ouverts

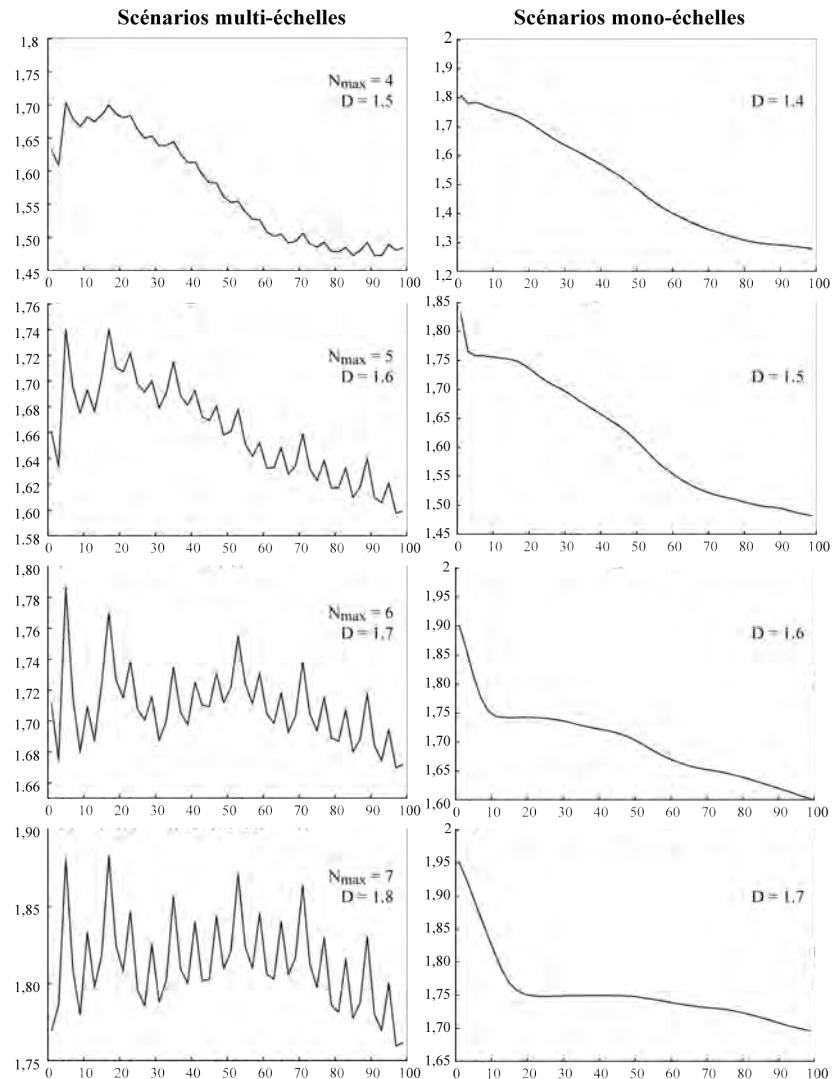
Taille minimale de cellule	N_{\max}	Nombre de cellules bâties contiguës à au moins une cellule non bâtie	
		Scénarios mono-échelles	Scénarios multi-échelles
50	4	4 239	4 934
50	5	5 127	6 332
50	6	5 396	8 215
50	7	4 751	10 813
20	4	15 763	20 649
20	5	20 451	28 555
20	6	19 230	41 091
20	7	14 341	60 546

Diversité interne du tissu bâti

Des publications antérieures ont montré l'intérêt de l'analyse fractale de corrélation pour mesurer la diversité interne d'un tissu bâti, notamment [De Keersmaecker et al., 2003; Tannier & Pumain, 2005]. Nous avons donc choisi de baser notre évaluation sur ce critère. L'analyse fractale de corrélation consiste à entourer chaque cellule bâtie d'une fenêtre carrée dont la taille augmente pas à pas. A chaque étape, le nombre moyen de cellules bâties par fenêtre est compté. Les résultats sont représentés sur un graphique dont l'axe des abscisses correspond à la taille des fenêtres de comptage et l'axe des ordonnées au nombre moyen de cellules bâties par fenêtre. A partir de l'estimation de la courbe ainsi obtenue, il est possible de calculer la dimension fractale de corrélation. Il est aussi possible de construire une autre courbe, appelée courbe du comportement scalant, qui représente la dimension fractale locale mesurée pour deux points contigus de la courbe empirique [Frankhauser, 1997]. Les variations locales de la courbe du comportement scalant montrent des changements de dimension fractale, donc des variations de l'organisation spatiale du bâti, pour le niveau d'analyse correspondant.

Les analyses réalisées⁵ montrent que les scénarios multi-échelles permettent d'obtenir une plus grande diversité interne du tissu bâti (figure 17). En effet, les dimensions fractales de corrélation sont à chaque fois plus élevées que pour les scénarios mono-échelles, sans toutefois dépasser 1,8 qui tendrait vers une occupation uniforme de l'espace par le bâti. Les courbes du comportement scalant correspondant aux scénarios multi-échelles présentent en outre de fortes variations locales, qui correspondent à de fortes variations des dimensions fractales entre deux échelles d'analyse. L'irrégularité de ces courbes dénote une forte diversité (un grand contraste) interne aux tissus bâties étudiés. Les courbes mono-échelles s'apparentent à une version lissée des courbes multi-échelles. Le fait que les deux familles de courbes présentent une même tendance s'explique par la présence du réseau routier : dans le modèle comme dans la réalité, le réseau routier existant structure fortement l'urbanisation.

⁵ Les analyses ont été effectuées avec le logiciel *Fractalyse 2.4* [Vuidel et al., 2006].

Figure 17. Résultats des analyses fractales de corrélation – Taille minimale de la cellule égale à 20 m.

Organisation spatiale hiérarchique du tissu bâti

Un tissu bâti organisé selon un principe hiérarchique est composé d'agrégats bâtis de taille variée, les agrégats les plus gros étant les moins nombreux. Dans une optique d'aménagement, une telle organisation spatiale est intéressante, car elle facilite le développement de centres de commerces et services accessibles par divers modes de transport [Frankhauser & Genre-Grandpierre, 1998]. Nous avons choisi de calculer un coefficient de Gini pour caractériser la distribution du nombre d'agrégats bâtis en fonction de leur taille caractérisant les seize tissus bâtis simulés.

La valeur du coefficient de Gini est comprise entre 0 et 1. Une valeur faible (proche de 0) caractérise une distribution égale dans laquelle tous les agrégats ont la même taille. Une valeur forte (proche de 1) signe l'inégalité d'une distribution, comportant un seul gros agrégat parmi un ensemble de très petits agrégats. Une organisation spatiale hiérarchique devrait correspondre à une valeur du coefficient de Gini s'approchant de 0,5. Tous les scénarios sont caractérisés par des valeurs du coefficient de Gini proches de 1 (tableau 7). Les 16 tissus bâtis sont donc assez loin d'une stricte distribution hiérarchique à laquelle correspondrait une grande variété de taille des agrégats. Toutefois, les valeurs du coefficient de Gini des scénarios multi-échelles

sont toujours inférieures à celles des scénarios mono-échelles correspondants. Ceci suggère une organisation spatiale des tissus multi-échelles plus hiérarchique que ne l'est celle des tissus mono-échelles.

Tableau 7. Coefficient de Gini caractérisant la relation entre le nombre d'agrégats bâtis et leur taille

Taille minimale de cellule (en m.)	N_{max}	Coefficient de Gini normalisé	
		scénarios mono-échelles	scénarios multi-échelles
50	4	0.97	0,91
50	5	0.99	0.87
50	6	0.99	0.93
50	7	0.99	0.89
20	4	0.92	0.84
20	5	0.96	0.79
20	6	0.99	0.92
20	7	1	1

Synthèse de l'évaluation

Au final, les scénarios multi-échelles sont plus performants que leur pendant mono-échelle pour trois critères d'évaluation sur quatre : meilleure accessibilité aux espaces ouverts, plus grande diversité des tissus bâtis, organisation spatiale suivant davantage une logique hiérarchique. En revanche, l'évaluation est favorable aux scénarios mono-échelles pour l'accessibilité aux centres de commerces et services. Le tableau 8 permet de comparer plus précisément les résultats obtenus en terme d'accessibilité aux aménités urbaines et rurales avec ceux présentés dans [Frankhauser, 2000; Frankhauser, 2004; Frankhauser & Genre-Grandpierre, 1998]. Le tableau montre que, d'un point de vue global, les scénarios multi-échelles sont meilleurs que les scénarios mono-échelles quand N_{max} est égal à 7 ou 6 (voire 5), ce qui correspond à une très forte urbanisation de la zone d'étude. Pour ces scénarios, le gain d'accessibilité aux espaces ouverts est relativement plus élevé que la perte d'accessibilité aux centres de commerces et services. Cependant, cette comparaison demeure limitée car les accessibilités aux aménités urbaines et rurales ne sont pas évaluées sur le même principe. En outre, la variété des aménités rurales (différents types d'espaces ouverts de proximité directe ou accessibles par le réseau) n'est pas prise en compte.

Tableau 8. Accessibilité aux aménités urbaines et rurales – Ratio entre les résultats des versions multi- et mono-échelle d'un même scénario

Taille minimale de cellule	N_{max}	Distance moyenne aux centres de commerces et services		Nombre de cellules bâties contiguës à au moins une cellule non bâtie
		Fréquentation quotidienne	Fréquentation hebdomadaire	
50	4	119,3	123,5	116,4
50	5	122,2	130,9	123,5
50	6	124,2	129,5	152,2
50	7	121,1	125,9	227,59
20	4	135,8	139,3	131,0
20	5	133,2	137,3	139,6
20	6	126,6	132,2	213,7
20	7	116,5	120,3	422,2

En gras : le gain relatif d'accessibilité aux espaces ouverts du scénario multi-échelle par rapport au scénario mono-échelle est plus élevé que la perte relative d'accessibilité aux centres de commerces et services.

Conclusion

Le modèle multi-échelle MUP-City semble surtout intéressant quand l'objectif est d'urbaniser beaucoup et quand on considère des individus qui cherchent à consommer localement différentes aménités à partir de leur domicile. Ceci est cohérent avec les résultats obtenus par [Cavaillhès et al., 2004], montrant, sur la base d'une modélisation économétrique sur support spatial fractal, qu'une organisation spatiale de la rente foncière ne suivant pas un modèle de von Thünen apparaît quand les individus cherchent à avoir accès à des aménités variées (urbaines et rurales) et que celles-ci ne sont pas spécialement substituables.

Des études récentes sur les choix résidentiels ont certes mis en doute le fait que les individus aient une préférence pour des aménités de nature variée. D'après ces recherches, ni les aménités vertes, ni la qualité paysagère n'ont de réelle influence sur les choix résidentiels [Vogt & Marans, 2004]. Sans remettre en cause ces résultats, ni ceux de [Cavaillhès et al., 2004], et en s'appuyant sur les travaux de [Geoghegan, 2002], on peut poser l'hypothèse que la ville fractale ne correspond pas à un modèle de choix résidentiel à un instant donné, mais à un modèle de satisfaction résidentielle au cours du temps : dans une ville fractale, la qualité de l'environnement résidentiel serait préservée, voire améliorée, et par conséquent la satisfaction des individus le serait aussi. Des réflexions en ce sens supposeraient notamment d'évaluer la capacité d'un modèle d'urbanisation fractal à préserver la connectivité des espaces bâtis et non bâtis, ce qui n'a pas encore été fait jusqu'ici.

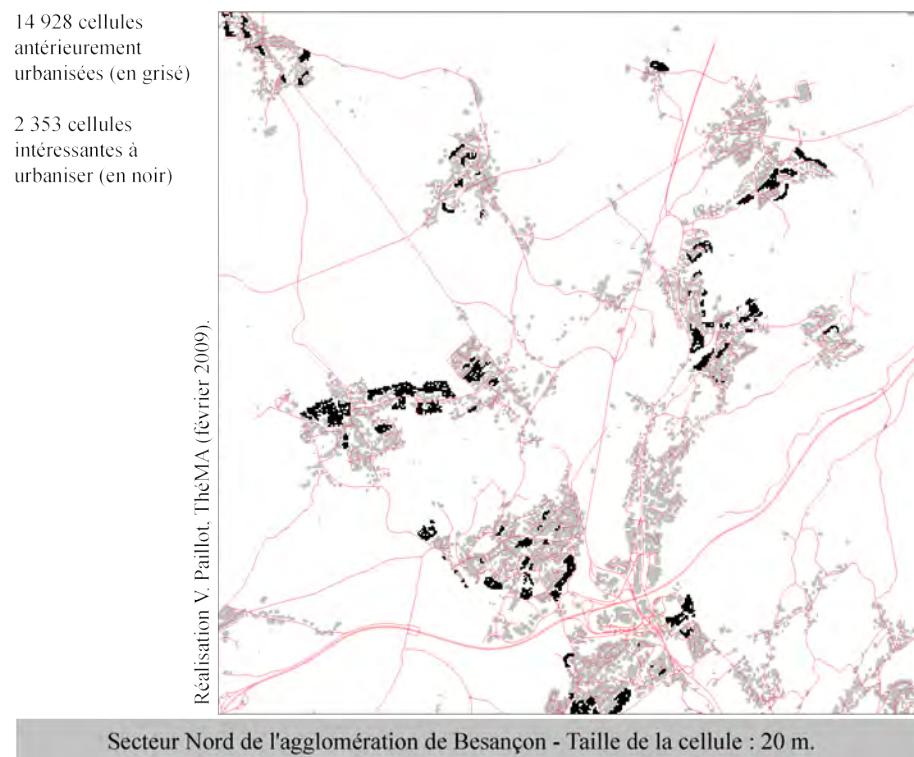
5 scénarios réalistes pour tester l'utilité de MUP-City pour l'aménagement urbain

Ces analyses ont été publiées dans : FRANKHAUSER P., TANNIER C., VUIDEL G., HOUOT H. (à paraître), Une approche multi-échelle pour le développement résidentiel des nouveaux espaces urbains, in J.-P. Antoni (Ed) *Modéliser la ville. Forme urbaine et politiques de transport*, Economica, Coll. Méthodes et approches.

Le point de départ de l'expérimentation a consisté en un projet de développement urbain du secteur proposé par l'Agence d'urbanisme de l'agglomération de Besançon (AUDAB) et accepté par les maires des 10 communes concernées. Ce projet définissait des règles pour l'urbanisation future : 17 logements par hectare et une taille de la parcelle égale à 500 à 600 m². Le nombre de logements à construire par commune était également fixé. Le projet était spatialisé sous la forme d'un plan d'aménagement identifiant les zones dans lesquelles l'urbanisation serait possible. Sur cette base, l'AUDAB, nous a demandé de concevoir des scénarios de développement alternatifs répondant aux objectifs du projet.

Nous avons d'abord créé un scénario d'urbanisation qui représente une réalisation possible du projet d'aménagement de l'AUDAB. Concrètement, à partir de la carte du tissu urbain existant, environ 1 300 nouveaux bâtiments ont été cartographiés en respectant les règles et la spatialisation du projet de l'AUDAB⁶. Cette représentation cartographique vectorielle a ensuite été convertie en mode raster⁷ pour pouvoir la comparer avec des scénarios issus de MUP-city (figure 18). La carte raster comprend 2 353 cellules nouvellement urbanisées.

Figure 18. Une spatialisation possible du projet de développement résidentiel de l'AUDAB



⁶ Ce travail a été réalisé par sous le logiciel MapInfo par Vincent Paillot, étudiant à l'école d'architecture de Strasbourg et en stage de 2^{ème} année du cycle conduisant au diplôme d'état d'architecte à ThéMA (décembre 2008 – mars 2009).

⁷ Il s'agit du passage à une représentation cartographique en mode « point par point », donc une discréétisation de l'image.

Figure 19. Deux scénarios alternatifs générés avec MUP-City 0.3

Dans un deuxième temps, nous avons créé quatre scénarios d'urbanisation alternatifs qui répondent aux objectifs du projet sans forcément correspondre à la spatialisation proposée par l'AUDAB. Le nombre de logements par commune fixé par l'AUDAB n'a pas non plus été respecté. Deux des quatre scénarios ont été réalisés à partir de la version multi-échelle de MUP-city 0.3 : un en version « basique » et un en version « stricte », la dimension fractale étant fixée à $D = 1,26$ ce qui correspond à $N_{max} = 4$ (figure 19). Dans les deux cas, les quatre règles additionnelles d'accessibilité ont été activées. Nous avons ainsi obtenu deux scénarios

fractals de développement résidentiel comportant 7 765 cellules nouvellement urbanisées pour la version « basique » et 5 474 nouvelles cellules bâties pour la version « stricte ». Ces nombres étaient largement supérieurs au nombre de cellules nouvellement urbanisées correspondant à la spatialisation du scénario de l'AUDAB (2 353). Nous avons donc supprimé certaines cellules dans chacun des scénarios fractals via l'introduction *a posteriori* de nouvelles contraintes d'accessibilité. Pour le scénario fractal « basique », nous n'avons conservé que les cellules nouvellement bâties situées à moins de 1 000 mètres d'un centre de commerces et services de fréquentation quotidienne, et à moins de 1 500 mètres d'un centre de commerces et services de fréquentation hebdomadaire. Ceci a ramené le nombre de cellules nouvellement urbanisées à 2 633. Pour le scénario fractal « strict », nous avons conservé les cellules nouvellement bâties situées à moins de 1 400 mètres d'un centre de commerces et services de fréquentation quotidienne, et à moins de 1 420 mètres d'un centre de commerces et services de fréquentation hebdomadaire ; ainsi le nombre de cellules nouvellement urbanisées était de 2 352. Le nombre de cellules retenues pour l'urbanisation est donc dans les deux cas très proche de celui du scénario de la figure 10 qui se réfère aux préconisations de l'AUDAB.

Les deux autres scénarios ont également été développés avec MUP-city, mais cette fois-ci en version mono-échelle, donc sans activer la règle d'urbanisation fractale. Une première simulation correspond à la version « basique » en fixant le nombre de cellules nouvellement urbanisées à 2 633, tandis que la deuxième simulation est l'équivalent de la version « stricte » car nous avons limité le nombre de cellules à urbaniser à 2 352.

La confrontation visuelle de trois des cinq scénarios créés montre que les formes de développement urbain obtenues sont très différentes (figures 18 et 19). Le scénario non-fractal « basique » se caractérise par des formes complètement compactes et un développement résidentiel concentré en très peu de lieux. Le scénario correspondant à la spatialisation du projet de l'AUDAB présente des formes de développement moins compactes, et réparties en davantage de lieux. Les zones de contact entre secteurs bâties et non bâties sont très nettement dessinées et très rectilignes. Enfin le scénario fractal « basique » présente des formes de développement plus dispersées tout en restant assez proches des noyaux bâties existants. Des cellules nouvellement urbanisées se localisent également dans les tissus centraux des villages. Le contact entre zones bâties et non bâties est plus flou.

Les cinq scénarios ont été évalués en terme d'accessibilité aux commerces et services et aux espaces non bâties, sur la base de trois simples critères d'évaluation (tableau 9).

Tableau 9. Performances comparées des différents scénarios en termes d'accessibilité aux aménités urbaines et rurales
Taux de variation entre situation initiale et urbanisation simulée (en %). *Sont représentés en gras les scénarios présentant un gain d'accessibilité aux espaces ouverts et aux centres de commerces et services par rapport à la situation actuelle*

Intitulé du scénario	Distance moyenne calculée sur le réseau au commerce et service le plus proche		Nombre de cellules bâties contiguës à au moins une cellule non bâtie
	Fréquentation quotidienne	Fréquentation hebdomadaire	
Spatialisation AUDAB	- 4.2	- 4.3	14.2
Fractal « basique »	- 6.4	- 3.9	18.7
Fractal « strict »	- 3.9	- 2.7	16.7
Non-fractal « basique »	-11.3	- 8.8	- 3.8
Non-fractal « strict »	-11.0	-10.4	- 3.9

Quel que soit le scénario d'urbanisation considéré, la distance moyenne au commerce et service le plus proche, calculée sur le réseau, diminue. Ceci indique que les cellules nouvellement urbanisées sont localisées à proximité des commerces et services existants. D'un point de vue global, les deux scénarios fractals et la spatialisation du projet de l'AUDAB permettent une amélioration de l'accessibilité aux aménités urbaines et rurales. L'amélioration paraît légèrement supérieure aux autres pour le scénario fractal « basique ». Les deux scénarios non fractals améliorent eux davantage l'accessibilité aux commerces et services, mais de nombreuses cellules bâties se retrouvent privées d'un contact direct avec une cellule non bâtie.

La localisation des cellules nouvellement urbanisées dans les quatre scénarios fractals et non-fractals dépend en partie des seuils de distance aux commerces et services introduits *a posteriori*. Cependant, des analyses ont montré qu'on n'observe pas de relation entre les valeurs des seuils fixés au préalable et la qualité de l'accessibilité aux commerces et services telle qu'elle figure dans le tableau 5. Par exemple, dans le cas des scénarios fractals, le seuil de distance aux commerces et services de fréquentation quotidienne est plus élevé pour le scénario « strict » (1400 m) que « basique » (1000 m). La distance moyenne d'une cellule bâtie au commerce et service le plus proche est également plus élevée pour le scénario « strict » (797 m) que pour le scénario « basique » (636 m). Inversement, le seuil de distance aux commerces et services de fréquentation hebdomadaire est légèrement plus élevé pour le scénario fractal « basique » (1500 m) que pour le scénario « strict » (1420 m). Or le premier scénario présente une distance moyenne de chaque cellule bâtie au commerce et service le plus proche inférieure à celle mesurée pour le deuxième scénario (710 m contre 769 m).

Finalement, cette expérimentation menée sur le secteur Nord de l'agglomération de Besançon suggère qu'une urbanisation fractale peut représenter une alternative intéressante à une urbanisation plus classique, proposant habituellement des formes assez compactes caractérisées par une limite nette et plutôt rectiligne du tissu urbanisé.

20 scénarios réalistes visant à améliorer l'accessibilité aux commerces et services

Ces analyses ont été présentées dans : HOUOT H., TANNIER C., VUIDEL G. FRANKHAUSER P. (2009), Multi-scale scenarios of urban residential development and accessibility to retail stores and facilities. 16th European Colloquium on Theoretical and Quantitative Geography, Maynooth-Ireland, 4-8 September 2009.

Les analyses menées précédemment ont montré que des scénarios fractals peuvent représenter une alternative intéressante à la ville compacte. Cependant, ces analyses ont aussi montré que des scénarios fractals peuvent être moins performants que des scénarios non fractals en terme d'accessibilité aux commerces et services. Ceci nous a incité à tester différentes possibilités d'améliorer l'accessibilité locale aux commerces et services sur la base de scénarios d'urbanisation fractals.

Vingt scénarios d'urbanisation fractals ont été créés avec MUP-City. Pour chaque scénario, le nombre de cellules nouvellement urbanisées était toujours le même (environ 2 350), ce qui correspond au développement résidentiel envisagé par l'Agence d'urbanisme de l'agglomération de Besançon pour la zone d'étude. Pour chacun des 20 scénarios créés, la localisation des cellules nouvellement urbanisées change en fonction de trois variables : l'armature commerciale de la zone d'étude (ajout ou déplacement de commerces) ; la concentration plus ou moins forte l'urbanisation autour des deux haltes ferroviaires ; le nombre maximal de cellules pouvant être urbanisées par maille (N_{max}). Cinq configurations spatiales des commerces et services ont été testées :

- A 1 : armature commerciale actuelle
- A2 : création d'un tabac-presse dans la future gare TGV
- A3 : création d'une boulangerie et d'un tabac-presse dans une des haltes ferroviaires, déplacement d'une boulangerie pour la localiser à proximité de l'autre halte ferroviaire
- A4 : création d'une boulangerie dans une des haltes ferroviaires ; création d'un tabac-presse dans l'autre halte ferroviaire
- A5 : création de deux commerces entre deux communes, entre lesquelles l'Agence d'urbanisme souhaite un développement résidentiel

Pour chacune de ces situations, quatre valeurs de N_{max} ont été testées (de 3 à 6). En combinant ces quatre valeurs de N_{max} et les cinq configurations spatiales des commerces et services, nous avons simulé 20 scénarios de développement résidentiel avec MUP-City. A chaque fois, les quatre règles d'accessibilité de MUP-City ont été activées et appliquées en version « basique ».

Comme N_{max} varie, le nombre de cellules nouvellement urbanisées identifiées par MUP-City varie également. Qui plus est, ce nombre est toujours supérieur à 2 350. Nous avons donc introduit *a posteriori* deux seuils de distance, l'un aux haltes ferroviaires et l'autre aux commerces et services, afin de réduire le nombre de cellules nouvellement urbanisables (cf. figure 20). Ces seuils de distance varient selon les scénarios.

Selon les valeurs de N_{max} choisies, les formes de développement résidentiel simulées sont très différentes. La figure 21 en donne une illustration considérant la configuration A5 de commerces et services. A gauche, la valeur de N_{max} est égale à 3 et les cellules nouvellement urbanisées sont assez dispersées. A droite, en revanche, l'urbanisation est davantage concentrée à proximité des villages et des haltes ferroviaires. Un second exemple est fourni par la figure 22, considérant cette fois la configuration A4 des commerces et services. Les formes d'urbanisation sont là encore bien différentes selon que N_{max} est égal à 4 ou à 6. Dans ce dernier cas, le tissus bâti est clairement compact.

Figure 20. Application d'un seuil de distance pour contraindre le nombre de cellules nouvellement urbanisées. Exemple pour un scénario avec N_{max} égal à 5 — Nombre de cellules initialement bâties (en grisé) : 15 200

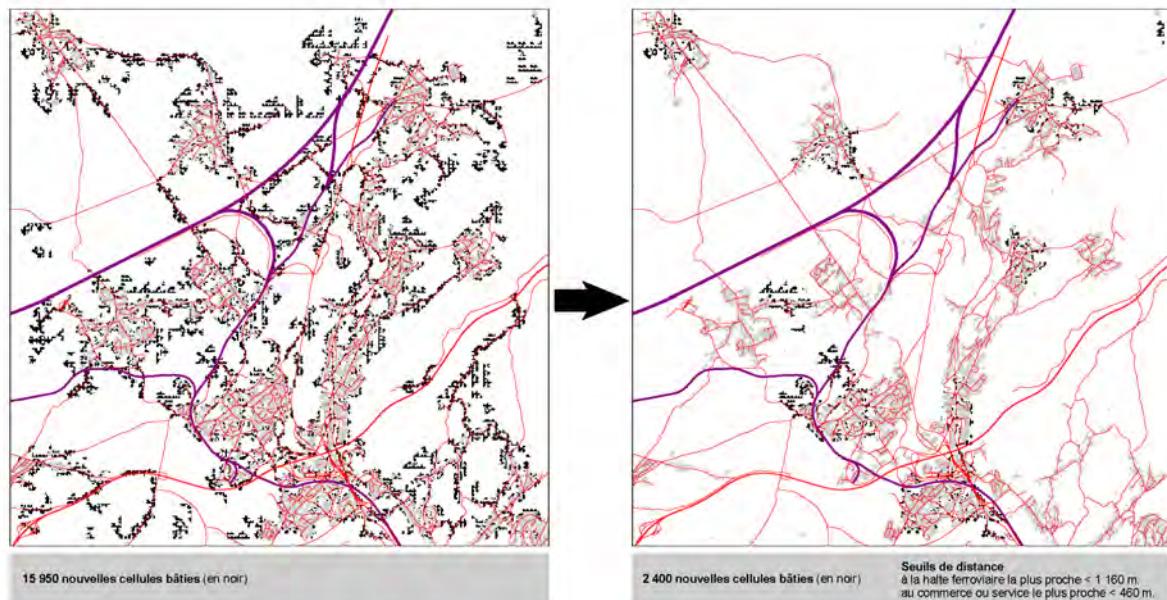


Figure 21. Deux scénarios de développement résidentiel simulés à partir de la configuration A5 des commerces et services (création de deux commerces entre deux communes) — 15 200 cellules initialement bâties (en grisé), 2 400 cellules nouvellement bâties (en noir)

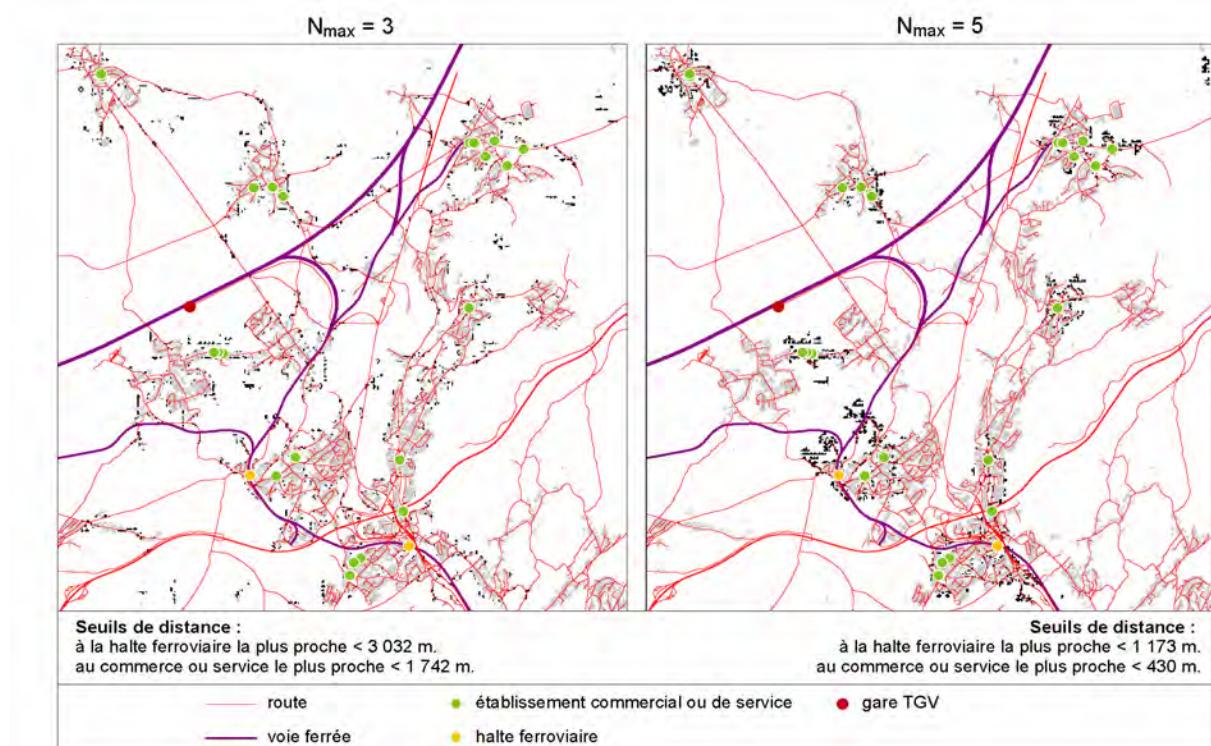
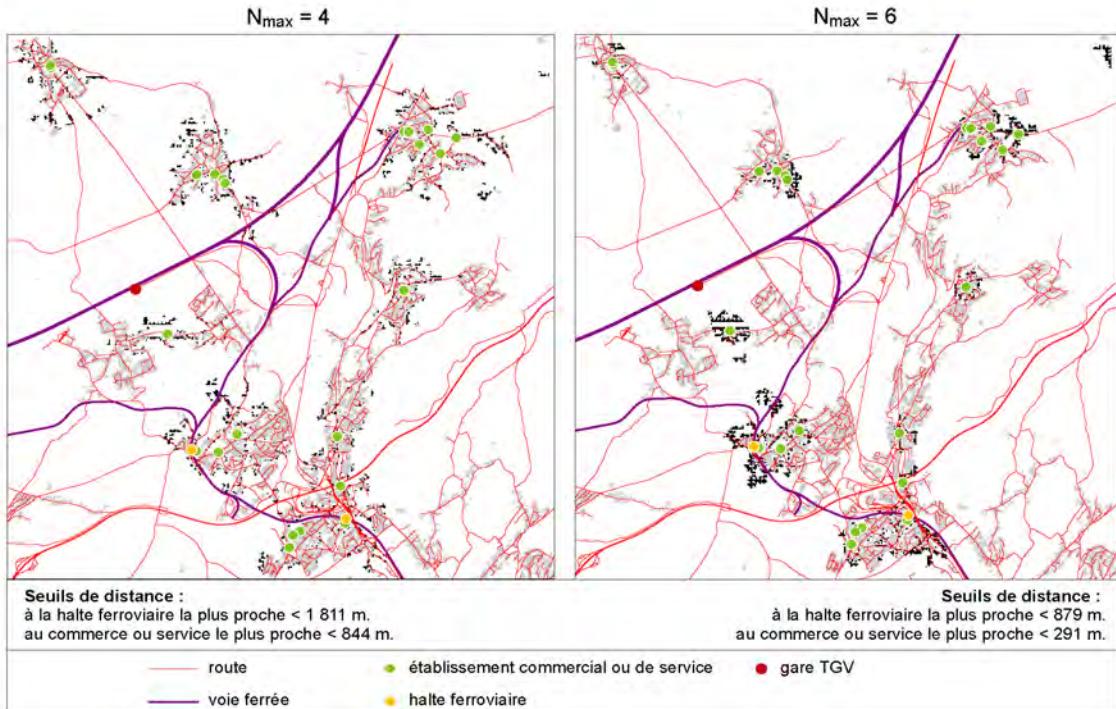


Figure 22. Deux scénarios de développement résidentiel simulés à partir de la configuration A4 des commerces et services (création d'un commerce dans chaque halte ferroviaire) — 15 200 cellules initialement bâties (en grisé), 2 400 cellules nouvellement bâties (en noir)



Pour chacun des vingt scénarios, sept indicateurs d'accessibilité ont été calculés afin de saisir différentes dimensions de l'accessibilité aux commerces et services dans la zone d'étude. Seule l'accessibilité aux commerces et services de fréquentation quotidienne a été étudiée. Toutes les distances ont été calculées sur le réseau, utilisant l'algorithme des plus courts chemins. Parmi l'ensemble des cellules bâties, seules les cellules résidentielles ont été considérées.

Le premier groupe d'indicateurs mesure la distance moyenne $\Lambda(m)$ (en mètres) des cellules bâties aux m -commerces et services les plus proches.

$$\begin{aligned} D_k &= \{d_{1k}, \dots, d_{ik}, \dots, d_{nk}\} \\ \lambda_k(1) &= \min[D_k] \\ \lambda_k(i+1) &= \min[D_k - \{\lambda_k(1) \dots \lambda_k(i)\}] \text{ with } i \in [1; n] \end{aligned}$$

$$\Lambda(m) = \frac{1}{l} \sum_{k=1}^l \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \lambda_k(i)$$

où i représente un commerce ou un service, k représente une cellule bâtie et D_k est l'ensemble des distances entre une cellule k et chaque commerce et service. Ce groupe d'indicateurs caractérise la proximité entre les cellules bâties et les commerces et services [Apparicio & Seguin, 2006]. Quand m est égal à 1, on mesure la distance moyenne au commerce et service le plus proche. Quand m est supérieur à 1, on mesure l'accessibilité à une plus grande variété de commerces et services. Quand m est égal à n , tous les commerces et services de la zone d'étude sont considérés ; on mesure alors le coût moyen pour atteindre l'ensemble des commerces et services.

Le deuxième groupe d'indicateurs compte le nombre moyen $\Delta(\gamma)$ de commerces et services situés à une distance inférieure à γ de chaque cellule bâtie. Trois valeurs de γ sont considérées : 400 m., 1 000 m. et

2 000 m. Ces indicateurs caractérisent la diversité de l'offre de commerces et services accessible depuis chaque cellule bâtie dans un voisinage donné [Apparicio & Seguin, 2006].

$$\Delta(\gamma) = \frac{1}{l} \sum_{k=1}^l \sum_{i=1}^n \delta_{ik}(\gamma) \text{ with } \begin{cases} \delta_{ik}(\gamma) = 1 \text{ if } d_{ik} \leq \gamma \\ \delta_{ik}(\gamma) = 0 \text{ if } d_{ik} > \gamma \end{cases}$$

Le tableau 10 présente les résultats obtenus pour N_{max} égal à 3. Cette valeur de N_{max} correspond à une dimension fractale faible caractérisant une forme urbaine proche d'une poussière de Fournier, c'est-à-dire constituée d'éléments non connexes. La première ligne du tableau présente les valeurs des indicateurs d'accessibilité pour la situation actuelle et les lignes suivantes présentent ces mêmes indicateurs calculés pour les cinq scénarios de développement résidentiel correspondant aux cinq configurations spatiales des commerces et services. On observe que la distance moyenne aux m -commerces et services les plus proches calculée pour chaque scénario est toujours inférieure à la même distance calculée pour la situation actuelle. Le nombre de commerces et services localisés à moins de 400 m. et 1 000 m. de chaque cellule bâtie est légèrement plus faible pour les situations simulées que pour la situation actuelle. Enfin, le nombre de commerces et services localisés à moins de 2 000 m. est un peu plus élevé pour les situations simulées que pour la situation actuelle.

Tableau 10. Accessibilité aux commerces et services — Pour les cinq scénarios N_{max} est égal à 3

	$\Lambda(m=1)$	$\Lambda(m=2)$	$\Lambda(m=3)$	$\Lambda(m=n)$	$\Delta(\gamma=400)$	$\Delta(\gamma=1000)$	$\Delta(\gamma=2000)$
Situation actuelle	1156,9	1466,4	1693,4	5301,7	0,45	1,67	3
A1-N3	1149,4	1451,7	1677,8	5272,3	0,41	1,57	3,05
A2-N3	1148,1	1442,9	1671,0	5283,3	0,41	1,57	3,07
A3-N3	1133,4	1413,4	1652,9	5249,2	0,42	1,65	3,31
A4-N3	1127,3	1409,3	1637,3	5220,1	0,43	1,68	3,33
A5-N3	1135,2	1327,1	1509,3	5252,3	0,43	1,65	3,35

En gras : l'accessibilité de la situation simulée est meilleure que celle de la situation actuelle.

Certains scénarios permettent davantage que d'autres d'améliorer l'accessibilité aux commerces et services, notamment les scénarios A4 et A5. Par ailleurs, pour certains indicateurs, l'amélioration est plus nette que pour d'autres (ex : pour A5-N3, gain de 184 m. considérant l'indicateur $\Lambda(m=3)$, contre un gain de 21 m. considérant l'indicateur $\Lambda(m=1)$).

Quand N_{max} est égal à 3, les scénarios améliorent la diversité des commerces et services accessibles si le voisinage considéré est assez large : indicateurs $\Lambda(m=2)$ et $\Lambda(m=3)$ et $\Delta(\gamma=2000)$ (tableau 11). En revanche, quand N_{max} est égal à 4, les indicateurs sont toujours meilleurs, même considérant des voisinages proches (tableau 12). Entre N_{max} égal à 3 et N_{max} égal à 4, les valeurs des indicateurs $\Delta(\gamma=400)$ et $\Delta(\gamma=1000)$ s'améliorent significativement.

Tableau 11. Évolution de l'accessibilité aux commerces et services entre la situation actuelle et chaque scénario simulé quand N_{max} est égal à 3

	$\Delta(m=1)$	$\Delta(m=2)$	$\Delta(m=3)$	$\Delta(m=n)$	$\Delta(\gamma=400)$	$\Delta(\gamma=1000)$	$\Delta(\gamma=2000)$
S1-N3	-0,7	-1,0	-0,9	-0,6	-8,7	-5,8	1,6
S2-N3	-0,8	-1,6	-1,3	-0,3	-8,6	-5,8	2,4
S3-N3	-2,0	-3,6	-2,4	-1,0	-7,7	-1,0	10,2
S4-N3	-2,6	-3,9	-3,3	-1,5	-5,1	0,8	11,1
S5-N3	-1,9	-9,5	-10,9	-0,9	-3,9	-1,3	11,7

En italique : l'accessibilité est moins bonne pour la situation simulée que la situation actuelle.

En gras : l'accessibilité de la situation simulée est nettement meilleure que celle de la situation actuelle.

Tableau 12. Évolution de l'accessibilité aux commerces et services entre la situation actuelle et chaque scénario simulé quand N_{max} est égal à 4

	$\Delta(m=1)$	$\Delta(m=2)$	$\Delta(m=3)$	$\Delta(m=n)$	$\Delta(\gamma=400)$	$\Delta(\gamma=1000)$	$\Delta(\gamma=2000)$
S1-N4	-3,3	-2,8	-2,3	-0,7	0,0	2,1	0,4
S2-N4	-7,6	-6,8	-5,7	-0,7	0,3	5,2	7,3
S3-N4	-9,0	-9,1	-6,9	-1,4	1,4	10,8	16,6
S4-N4	-9,6	-9,4	-7,8	-1,9	4,0	12,9	17,5
S5-N4	-8,5	-14,4	-14,8	-1,2	6,5	10,3	15,9

En gras : l'accessibilité de la situation simulée est nettement meilleure que celle de la situation actuelle.

Les tableaux 13 et 14 présentent les résultats obtenus pour un même scénario (respectivement scénarios 4 et 5) et des valeurs de N_{max} différentes. La différence cruciale dans les valeurs des indicateurs d'accessibilité se manifeste entre N_{max} égal à 3 ou 4 d'un côté, et N_{max} égal à 5 ou 6 d'un autre côté. L'indicateur le plus remarquable ici est $\Delta(\gamma=400)$. En revanche, quelle que soit la valeur de N_{max} , le coût moyen pour atteindre l'ensemble des commerces et services varie très peu : seule l'accessibilité locale est améliorée par les scénarios fractals d'urbanisation.

Tableau 13. Scénarios simulés à partir de la configuration A4 considérant quatre valeurs de N_{max}

	$\Delta(m=1)$	$\Delta(m=2)$	$\Delta(m=3)$	$\Delta(m=n)$	$\Delta(\gamma=400)$	$\Delta(\gamma=1000)$	$\Delta(\gamma=2000)$
S4-N3	-2,6	-3,9	-3,3	-1,5	-5,1	0,8	11,1
S4-N4	-9,6	-9,4	-7,8	-1,9	4,0	12,9	17,5
S4-N5	-11,9	-10,5	-8,5	-1,8	19,1	17,2	15,4
S4-N6	-12,8	-10,83	-9,22	-2	25,81	20,27	15,76

Tableau 14. Scénarios simulés à partir de la configuration A5 considérant quatre valeurs de N_{max}

	$\Delta(m=1)$	$\Delta(m=2)$	$\Delta(m=3)$	$\Delta(m=n)$	$\Delta(\gamma=400)$	$\Delta(\gamma=1000)$	$\Delta(\gamma=2000)$
S5-N3	-1,9	-9,5	-10,9	-0,9	-3,9	-1,3	11,7
S5-N4	-8,5	-14,4	-14,8	-1,2	6,5	10,3	15,9
S5-N5	-11,4	-16,5	-16,4	-1,2	28,2	14,3	13,2
S5-N6	-11,1	-16,4	-17,2	-1,3	32,8	16	14,2

Au final, les résultats obtenus montrent que l'accessibilité aux commerces et services des différents scénarios est toujours meilleure que l'accessibilité calculée pour la situation initiale. L'urbanisation fractale ne détériore donc pas l'accessibilité aux commerces et services, mais au contraire, l'améliore.

La forme urbaine, prise en compte dans cette analyse via la valeur de N_{max} donc la dimension fractale, influe davantage sur l'accessibilité aux commerces et services que la configuration spatiale de l'offre commerciale (nombre et localisation des commerces et services). Ainsi, les analyses réalisées apportent un argument supplémentaire en faveur de l'utilisation de la dimension fractale comme outil d'aménagement, au même titre que peut l'être la densité bâtie.

Etude expérimentale pour l'élaboration des PLU des quatre communes riveraines de la future gare TGV de Besançon-Auxon

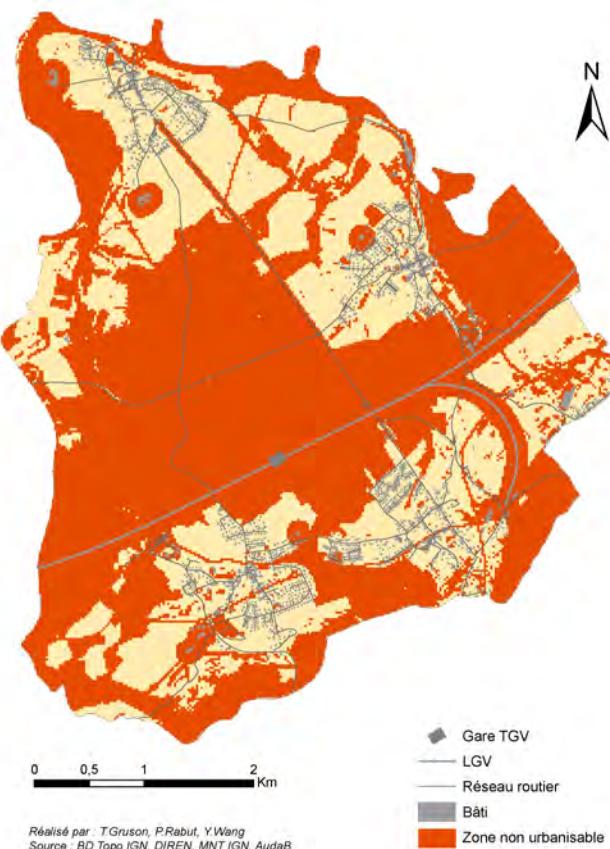
Cette étude a été présentée dans : Gruson T., Rabut P., Wang Y. (2010). *Modélisation fractale multi-échelle. Approche expérimentale pour l'élaboration des PLU des quatre communes riveraines de la future gare TGV*, Université de Franche-Comté – Master 2 IT-ISA, Tutrices universitaires : C. Tannier et H. Houot. Etude réalisée pour la CAGB et l'AUDAB, janvier 2010.

36 scénarios de développement résidentiel fractals ont été créés. Nous avons positionné la grille de décomposition (et donc la zone d'étude) de trois façons différentes, et avons fait varier la valeur de N_{max} entre 3 et 5. Pour chaque valeur de N_{max} et chaque position de grille, nous avons créés quatre scénarios :

- un scénario en activant les quatre règles d'accessibilité en « version basique » ;
- un scénario en activant les quatre règles d'accessibilité en version « stricte » ;
- un scénario en version « stricte » pour lequel nous n'avons activé que les deux règles d'accessibilité aux commerces et services ;
- un scénario également en version « stricte » pour lequel nous n'avons activé que les deux règles d'accessibilité aux espaces ouverts et de proximité au réseau routier existant.

Pour chaque scénario, les contraintes environnementales ont été prises en compte a posteriori en supprimant les cellules nouvellement urbanisées d'après le scénario si elles étaient situées dans une zone non constructible (figure 23).

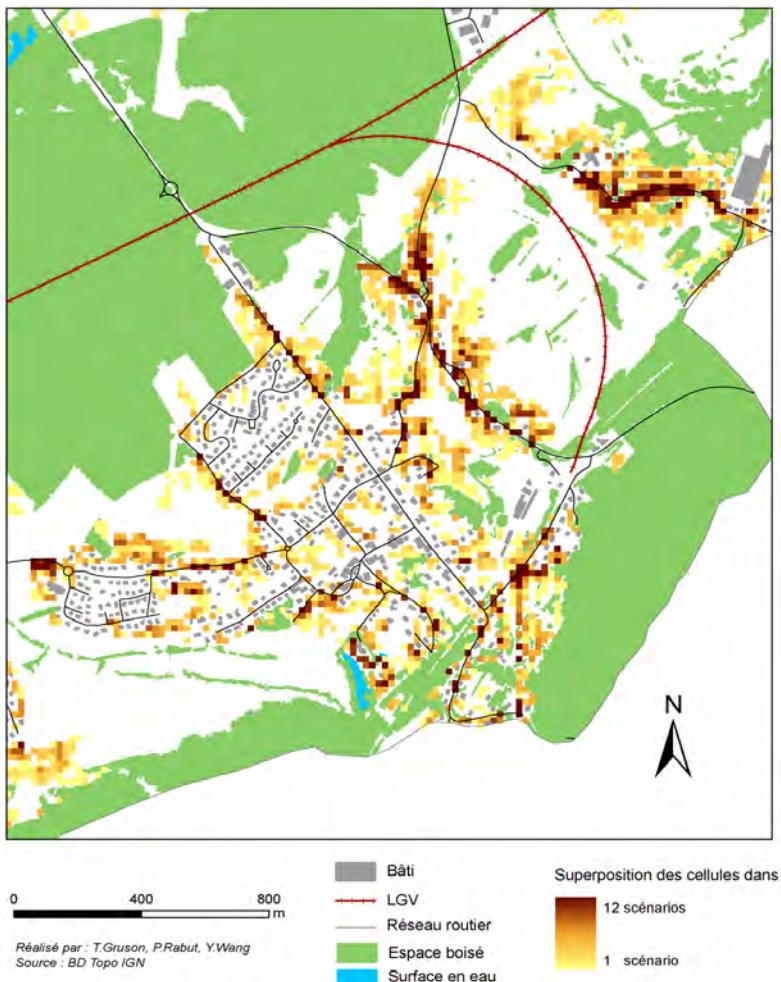
Figure 23. Zones non urbanisables : surfaces en eau, point de captage des eaux (périmètre de protection rapproché), failles, zones de pente supérieure à 15 %, ZNIEFF 1, corridors verts et bleus (d'après la trame vertes et bleue de la DIREN), zone-tampon de 100 m. autour des sièges d'exploitation agricole



Identifier des espaces préférentiels à une urbanisation fractale

La superposition de plusieurs scénarios permet d'identifier des espaces urbanisés dans la majeure partie des scénarios, qui peuvent être interprétés comme des espaces préférentiels à une urbanisation fractale. Sur la figure 24, ces espaces préférentiels correspondent à des groupements de cellules urbanisables d'une couleur foncée indiquant un grand nombre d'apparition des cellules à travers les scénarios.

Figure 24. Espaces préférentiels à l'urbanisation fractale considérant 12 scénarios simulés pour une valeur de N_{max} égale à 5 (Commune d'Auxon-Dessus)



Identifier des espaces à préserver

Pour l'aménagement urbain, on peut également identifier les espaces qui ne sont jamais ou rarement bâties par les scénarios fractals (figure 25). Ceux-ci ne devraient pas être urbanisés pour préserver la connectivité des espaces non bâties à travers les échelles. L'élaboration des PLU peut s'appuyer sur ce genre d'information, par exemple pour créer une structure villageoise s'organisant autour d'espaces non bâties en créant petit à petit des « places », des espaces de détente ou potagers, vergers, et en densifiant les abords de ces espaces. Ainsi, la contrainte imposée par la présence d'une ZNIEFF peut être vue non comme un obstacle, mais comme l'occasion de reconstruire un village autour d'une coulée verte formée par la zone protégée, incluant si possible des cheminements, des bancs, qui respectent et mettent en valeur la richesse écologique.

Figure 25. Espaces rarement ou souvent bâties d'après les scénarios issus de MUP-City (Commune de Cussey-sur-l'Ognon)



Ces différentes analyses permettent d'orienter le positionnement des zones urbanisables du PLU et ouvrent la voie à la transformation du parcellaire suivant une logique d'organisation spatiale fractale. De plus, il est possible de distinguer les secteurs où les cellules sont à urbaniser en priorité et les secteurs où les cellules peuvent être bâties sur le long terme, en tenant compte des contraintes environnementales et de l'intérêt des cellules être urbanisées d'après MUP-City.

Évaluation de la sensibilité des résultats de MUP-City au positionnement de la zone d'étude

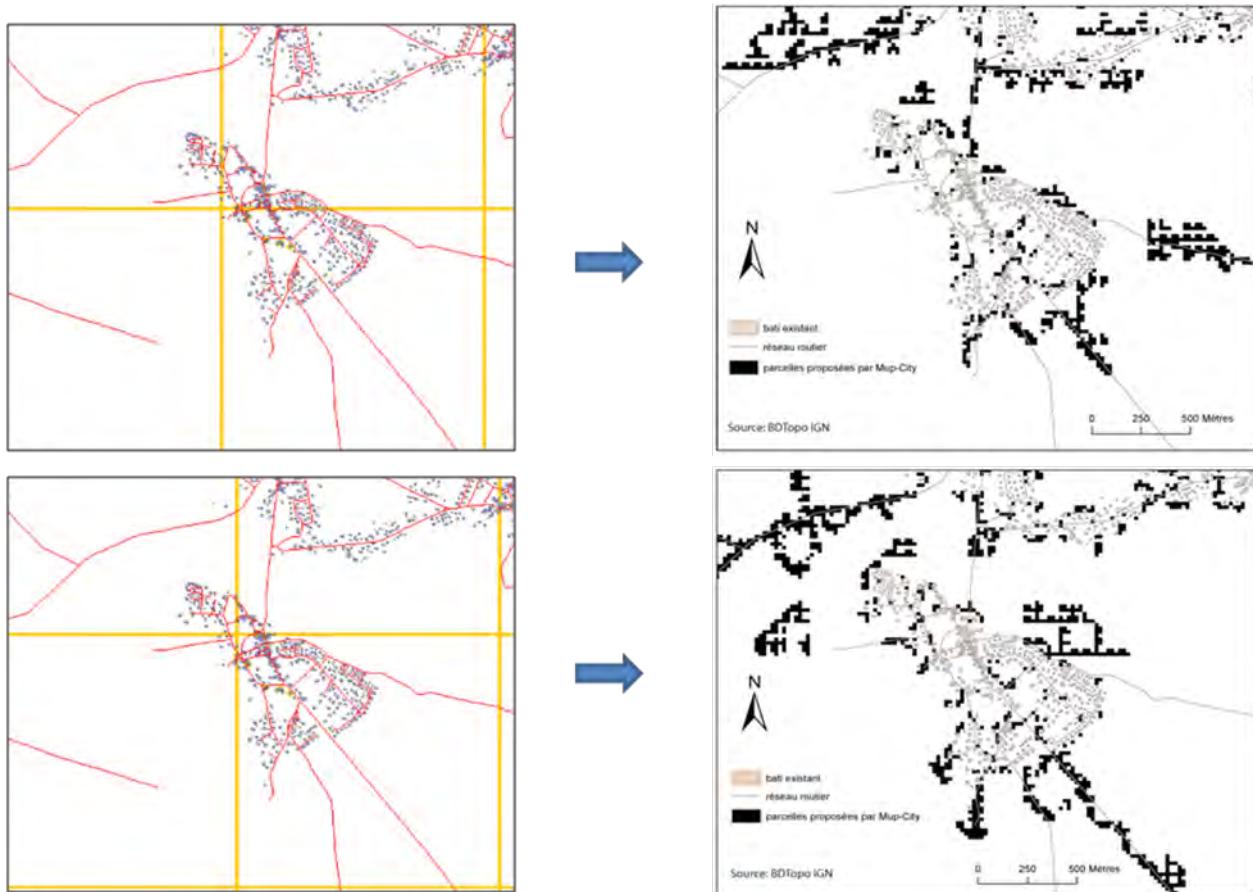
Les évaluations ex-post varient très peu selon la position G1, G2 ou G3 de la zone d'étude : les mesures d'accessibilité sont équivalentes dans les trois cas. Le modèle ne semble donc pas particulièrement sensible au positionnement de la grille de décomposition fractale. En revanche, le tissu urbain simulé est bien différent selon les trois positions de grille. Le tableau 15 donne le nombre de cellules proposées pour les scénarios N_{max} égal à 4 considérant les trois positions de grille, et le pourcentage de cellules en commun entre les scénarios deux à deux. Le nombre de cellules proposées à l'urbanisation varie peu, de 719 à 727 cellules.

Mais la localisation des cellules est très différente d'une grille à une autre, puisqu'au maximum, deux scénarios issus de deux positions de grilles différentes auront 15% de cellules en commun. Nous avons par ailleurs constaté que seules 3% des cellules nouvellement bâties d'après les scénarios se retrouvent dans les trois positions de grille. Les résultats sont sensiblement les mêmes pour des valeurs de N_{max} différentes. On peut se rendre compte visuellement de ces différences sur la figure 26.

Tableau 15. Variabilité des scénarios deux à deux, selon la position de la grille de décomposition – N_{max} égal à 4

Grille	nb cellules	G1	G2	G3
		720	727	719
G1	720	100%	14%	15%
G2	727	14%	100%	12%
G3	719	15%	12%	100%

Figure 26. Influence de la position de la grille sur les scénarios créés avec MUP-City (Commune de Cussey-sur-l'Ognon)



Pour un tissu bâti donné, il existe donc une multitude de choix possibles de cellules qui se prêtent à une urbanisation potentielle respectant les règles d'urbanisation du modèle. On comprend bien ainsi que MUP-City est un outil d'exploration. Il ne sert pas à identifier une localisation optimale *unique* des cellules urbanisables. Au contraire, MUP-City sert à simuler *différentes* configurations spatiales, accompagnées de

leurs évaluations en terme d'accessibilité aux aménités locales. Ensuite, c'est à l'utilisateur d'en tirer des conclusions pour l'aménagement de la zone étudiée, en confrontant pour cela les résultats fournis par MUP-City et les connaissances dont il dispose par ailleurs.

Récapitulatif des réalisations

MUP-City (version actuelle 0.7)

MUP-City est un logiciel développé en Java, en utilisant les bibliothèques Geotools et JTS (Java topology suite). Les données en entrée consistent en des shapefiles (fichiers .shp) : bâti, réseau routier, commerces et services, zones non constructibles. Les données en sorties sont de trois types : fichiers graphiques (.svg), images raster des scénarios créés (geotiff), tableaux de chiffres des évaluations ex-post (fichiers .txt). Le développement logiciel de MUP-City s'organise en trois volets principaux :

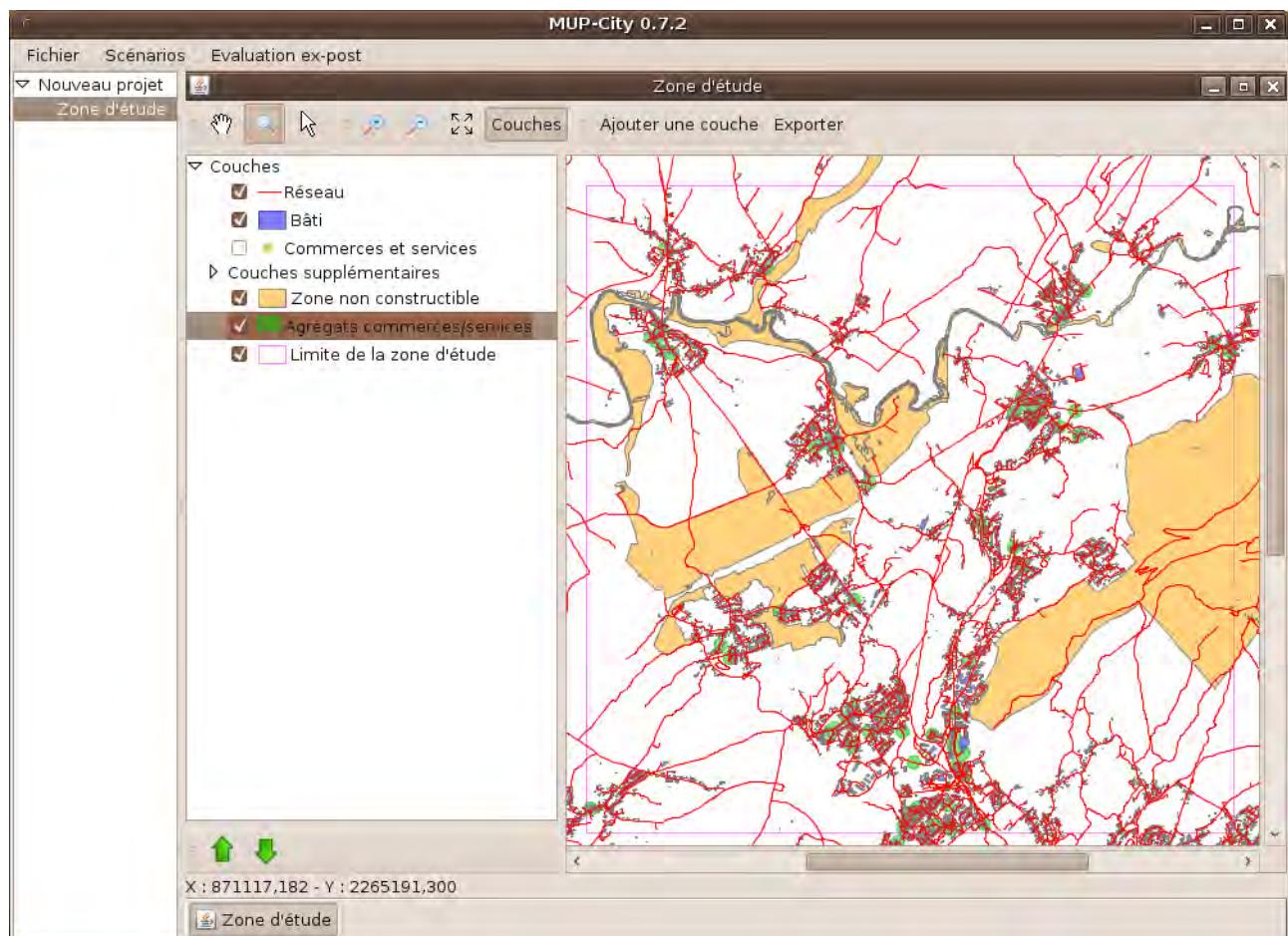
- ➔ Chargement, sélection et visualisation des données aux formats raster et vectoriel (fonctionnalités classiques de SIG).
- ➔ Décomposition multi-échelle des données spatiales : bâti, réseau, zones non constructibles.
- ➔ Analyses spatiales sur données raster (ex : comptage de nombre de contiguités entre cellules bâties et non bâties) et vectorielles (ex : calcul de distances sur le réseau).

L'interface est en deux langues, français et anglais, l'utilisateur pouvant choisir l'une ou l'autre via le menu Fichier → Préférences.

Détail des fonctionnalités développées

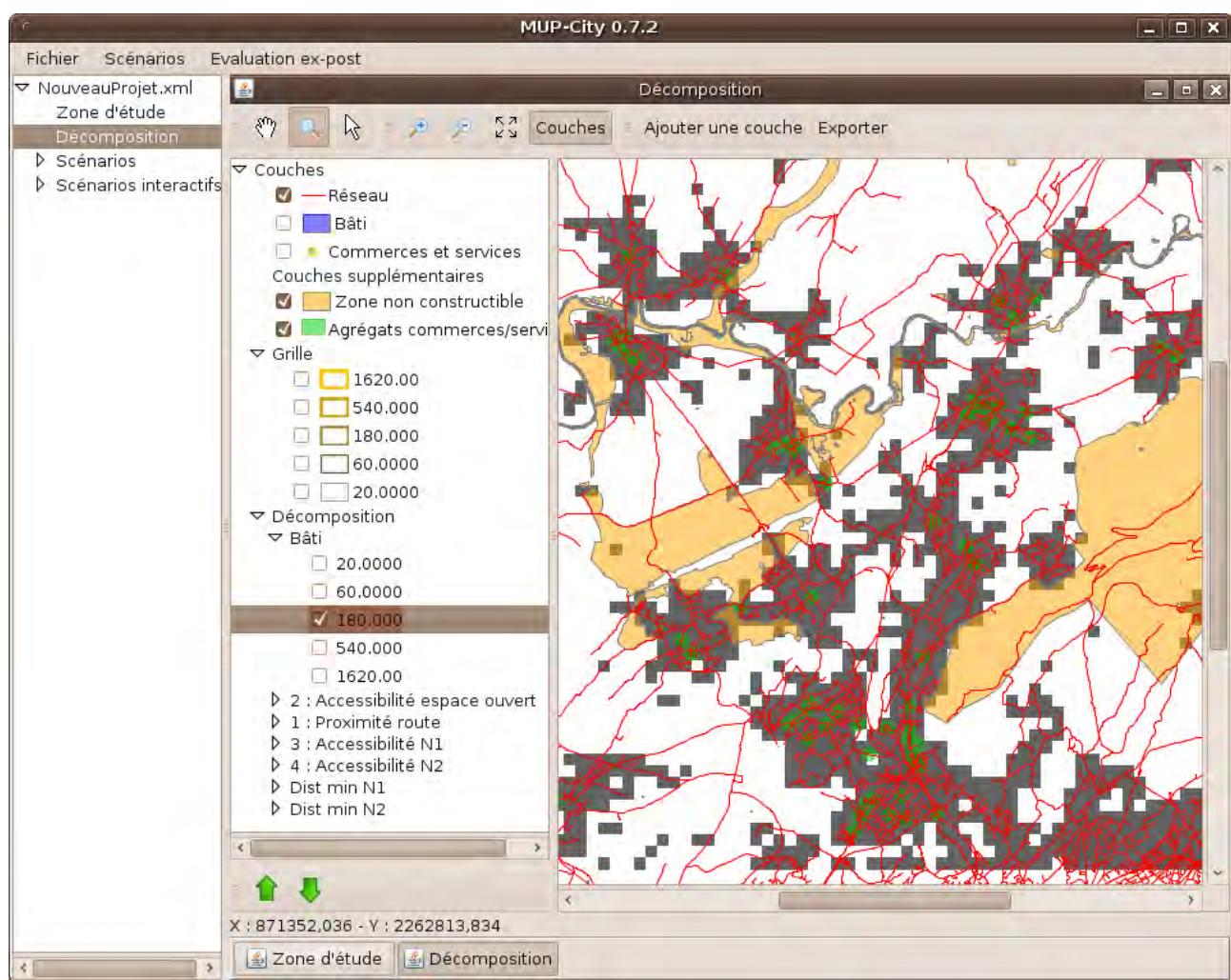
1. Chargement des données d'entrée

2. Crédit des agrégats de commerces et services : création d'un nouveau shapefile contenant ces agrégats



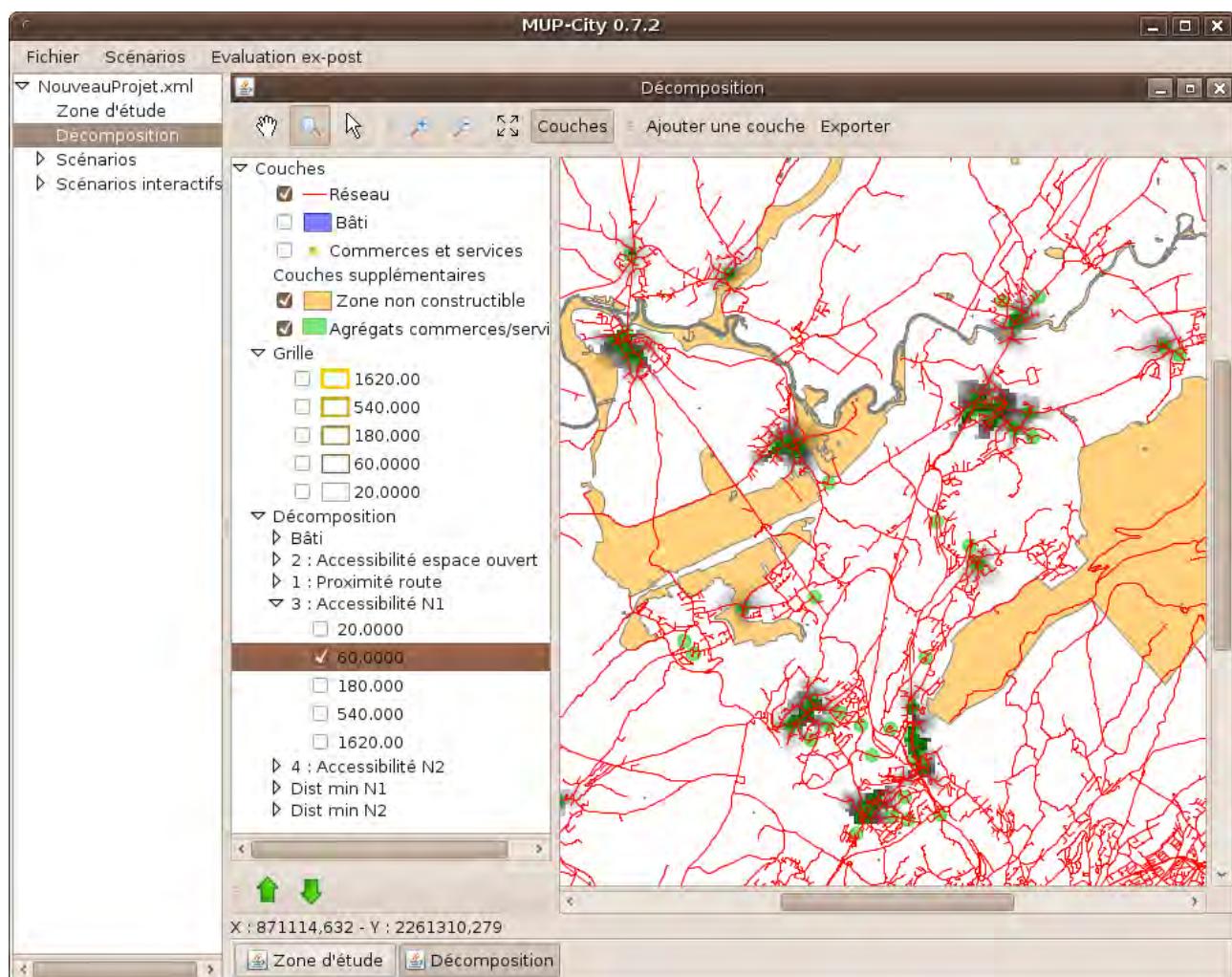
3. Décomposition fractale

La décomposition génère trois ensembles de couches raster comportant chacun une couche par échelle d'analyse (i.e. pour chaque taille de mailles) : présence/absence de bâti dans chaque cellule (définie simplement ou via l'application d'un seuil minimal de densité bâtie), présence/absence du réseau routier, présence/absence d'une zone non constructible (via le calcul d'une densité de zone non constructible par cellule).



4. Calcul des quatre règles additionnelles d'accessibilité

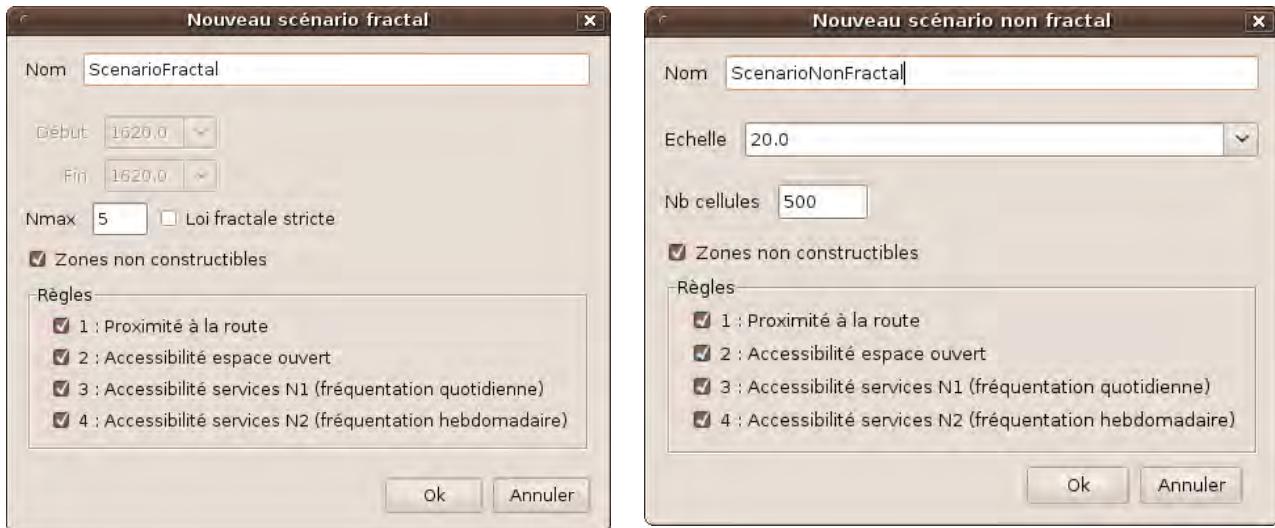
Les deux règles d'accessibilité aux commerces et services sont calculées en deux temps. Dans un premier temps, MUP-City calcule la distance par le réseau de chaque cellule à chaque agrégat. Il génère ainsi une couche raster pour chaque agrégat et chaque échelle d'analyse. Sur cette base, les deux règles d'accessibilité sont appliquées. La règle de proximité au réseau routier existant est calculée sur la base des différentes couches raster de présence/absence de routes dans chaque cellule, générées au moment de la décomposition fractale. Pour ces trois règles (commerces et services, réseau routier), les résultats obtenus sont stockés une fois pour toutes dans un fichier .tif. La quatrième règle d'accessibilité aux espaces ouverts est calculée à partir du comptage du nombre de contacts entre cellules bâties et non bâties effectué soit, sur la situation initiale, soit dynamiquement pour chacun des scénarios créés. Les résultats de cette règle sont stockés dans des couches dynamiques qui sont recalculées au moment de la création de scénarios.



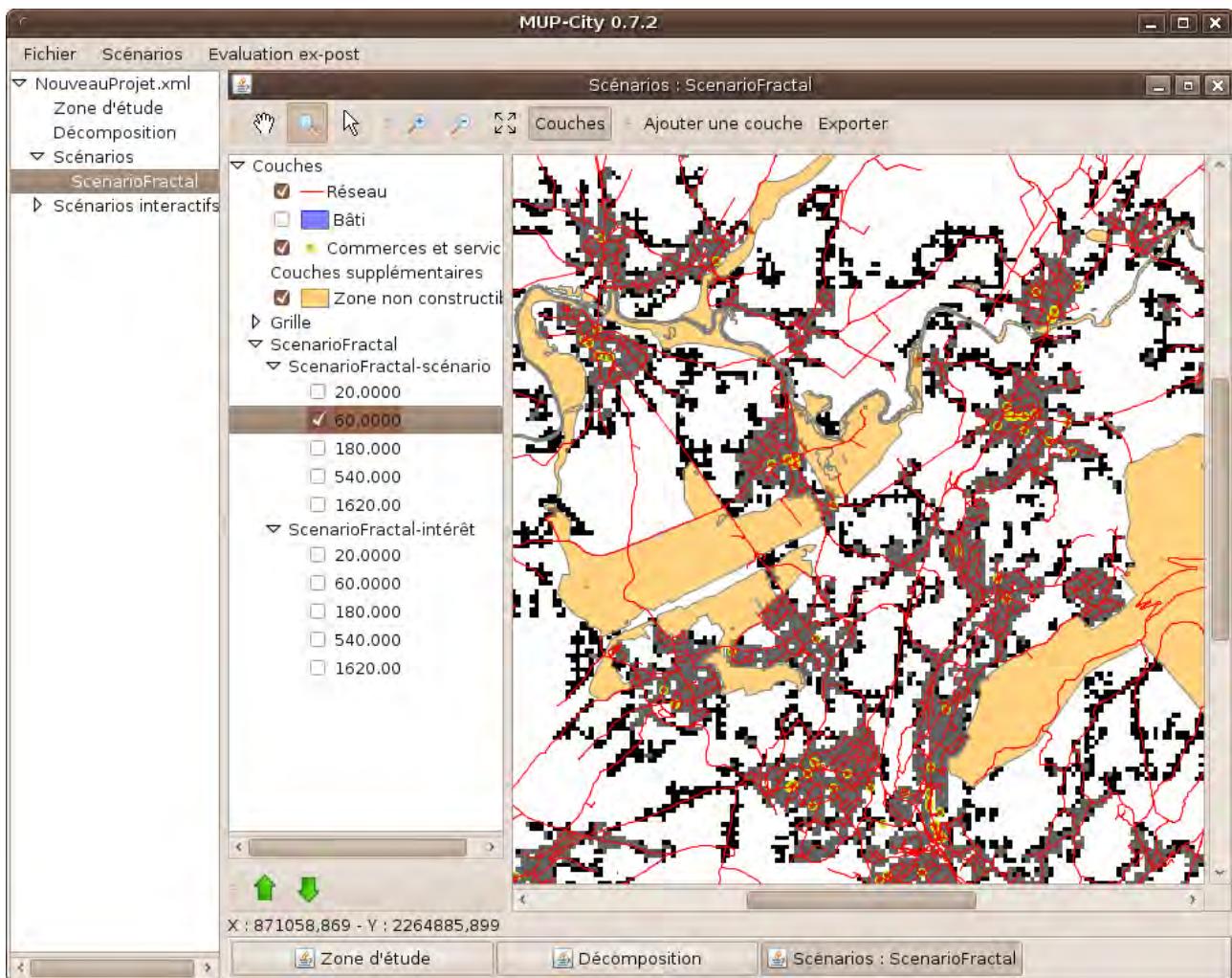
5. Crédit de scénarios de développement résidentiel fractals et non fractals

L'ouverture d'une fenêtre dans MUP-City permet à l'utilisateur de définir le scénario qu'il souhaite simuler. La création d'un scénario commence par le calcul de l'évaluation synthétique de l'intérêt des cellules à être urbanisées considérant les règles d'accessibilité sélectionnées. Ce calcul se fait de manière dynamique, de la même manière que le calcul de la règle d'accessibilité aux espaces ouverts : les cellules sont évaluées ; une cellule parmi les mieux évaluées est urbanisée ; les évaluations sont re-calculées ; une deuxième cellule parmi

les mieux évaluées est urbanisée... L'opération se poursuit ainsi de manière itérative jusqu'à ce que l'urbanisation de nouvelles cellules ne soit plus possible considérant le scénario. Dans une maille, quand il y a des *ex-aequo* parmi les cellules évaluées, le choix de l'une ou l'autre cellule est fait de manière aléatoire.



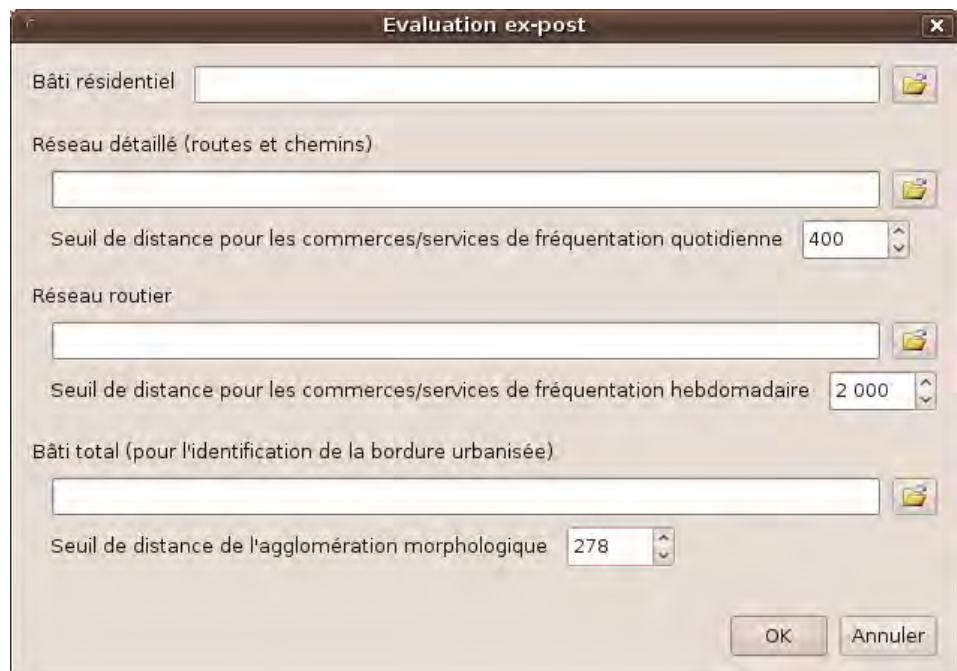
Au final, MUP-City génère deux séries de couches raster pour chaque échelle d'analyse. Une série présente l'intérêt des cellules à être urbanisées, et l'autre le scénario créé.



6. Évaluations ex-post des scénarios

Les fichiers de données sur lesquels les évaluations ex-post sont calculées ne sont pas forcément les mêmes que ceux sur lesquels les scénarios ont été créés. L'utilisateur doit donc charger les shapefiles sur lesquels seront calculées les évaluations :

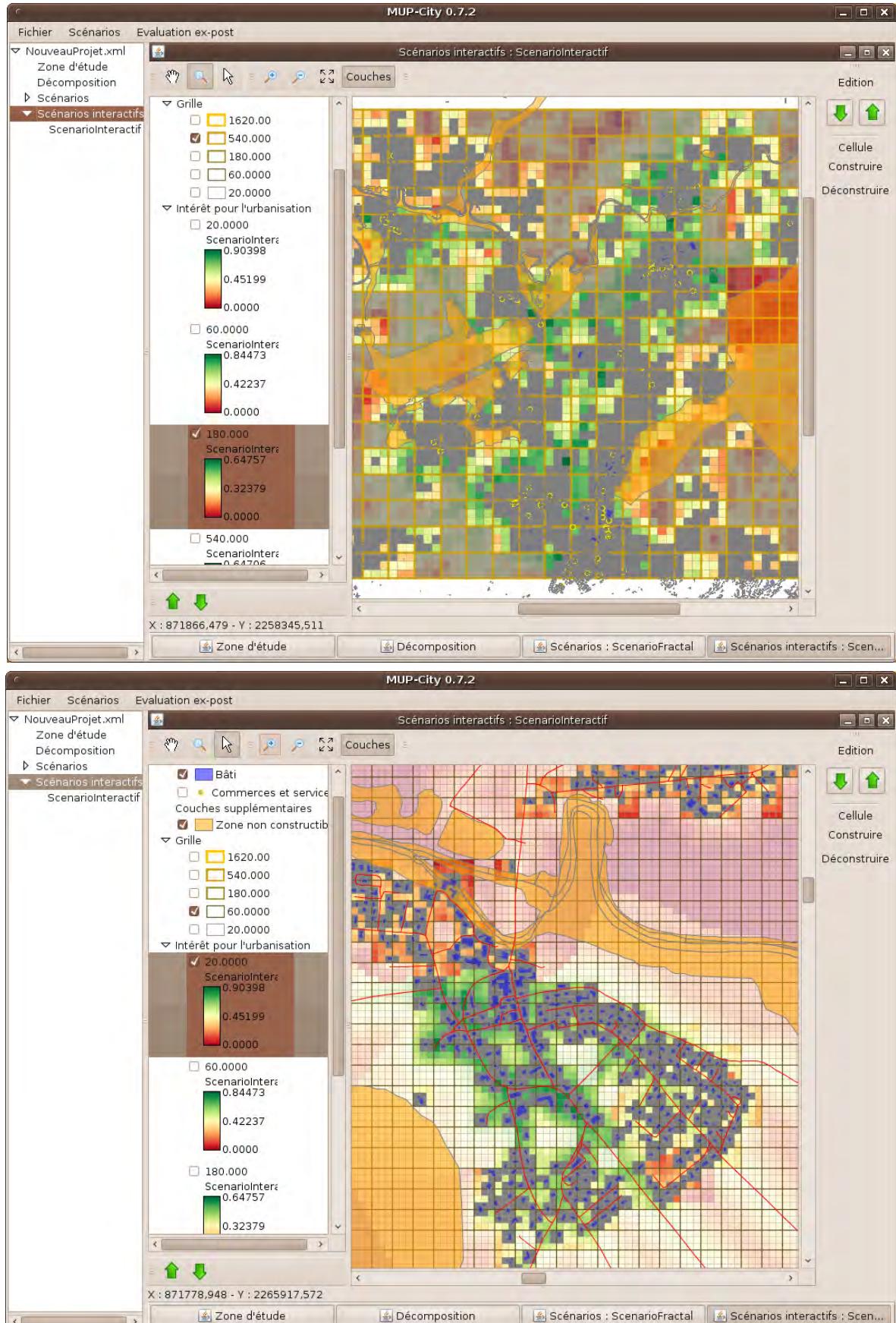
- 1) shapefile du bâti résidentiel, sachant qu'un scénario est en général créé à partir du bâti total (incluant, outre les bâtiments résidentiels, les bâtiments industriels, commerciaux...) ;
- 2) shapefile du réseau sur lequel seront calculées les distances aux commerces et services de fréquentation quotidienne et à la bordure urbanisée ;
- 3) shapefile du réseau sur lequel seront calculées les distances aux commerces et services de fréquentation hebdomadaire.



Une couche raster est créée à partir du shapefile du bâti résidentiel. Cette couche raster est combinée à la couche raster du scénario considéré afin d'obtenir l'ensemble des cellules de bâti résidentiel pour lesquelles les différents indicateurs d'accessibilité seront calculés. La bordure urbanisée est identifiée à partir du shapefile correspondant (précédemment chargé) auquel on ajoute les cellules nouvellement bâties d'après le scénario considéré. Contrairement aux autres analyses, les cellules sont dans ce cas des objets vectoriels issus de la vectorisation de la couche raster (geotiff) du scénario considéré. L'identification de la bordure urbanisée est en effet effectuée sur des données vectorielles.

Remarque : dans sa version actuelle, MUP-City ne permet pas l'évaluation ex-post des scénarios interactifs.

7. Scénarios interactifs



Les variables définissant un scénario interactif sont les mêmes que celles définissant un scénario fractal non interactif : valeur de N_{max} , activation de tout ou partie des règles d'accessibilité, prise en compte ou non de zones non constructibles. Pour aider l'utilisateur à choisir les cellules qu'il souhaite urbaniser, les valeurs synthétiques d'évaluation de l'intérêt de chaque cellule à être urbanisée sont représentées dans un dégradé de couleurs du rouge (faible intérêt à être urbanisée) au vert (fort intérêt à être urbanisée).

Sur le plan informatique, chaque cellule visualisée et modifiée par l'utilisateur est un objet, défini par une géométrie. Ceci est réalisé via la création d'une couche d'abstraction permettant de passer aisément du mode raster au mode vectoriel. Une série de couches raster, sous-jacentes à la couche interactive, contiennent le résultat du calcul de chaque règle d'accessibilité. Ainsi, chaque cellule « objet » de la couche interactive est caractérisée par la série des valeurs des cellules correspondantes dans les couches raster sous-jacentes.

Logiciel MorphoLim

MorphoLim est une application informatique dédiée à l'identification de la limite morphologique des agglomérations urbaines. La méthodologie développée présente l'intérêt de ne pas définir *a priori* un seuil maximal de distance entre les éléments bâtis considérés : ce seuil émerge de l'analyse et est propre à chaque zone d'étude considérée. La méthodologie fait appel aux concepts et outils de la géométrie fractale.

MUP-City reprend certains aspects de MorphoLim pour identifier et cartographier la bordure urbanisée d'une agglomération lors de l'évaluation ex-post de l'accessibilité aux espaces ouverts.

L'application informatique MorphoLim est téléchargeable sur la plateforme interactive pour la simulation spatiale du Groupe de recherche européen S4 : <http://spatial-modelling.info/MorphoLim-Identifying-city>

The screenshot shows a web browser window with the following details:

- Address Bar:** http://www.spatial-modelling.info/MorphoLim-Identifying-city
- Page Content:**
 - MorphoLim: Identifying city boundaries** (Section)
 - Authors of the application:** Cécile Tannier, Gilles Vuille, and Pierre Frankhauser (ThéMA, Besançon, France)
 - Conception date:** 2009
 - Step 1: Step-by-step dilation and counting of the number of built clusters** (Section)
 - Text explaining the process: "The data used are vector maps representing buildings in 2D (polygons). The spatial extent of a study area is necessarily large because it comprises an (either monopolar or multipolar) urban agglomeration and its hinterland (i.e., a suburban or rural area that is under the influence of its urban core)."
 - Text about the dilation process: "A vector version of the Minkowski dilation is applied to each built polygon of a map. This consists in surrounding each built polygon with a buffer of increasing width. The width of the buffer increases according to a geometric logic, which corresponds to the fractal logic. The number of clusters is counted after each dilation step. The results are portrayed as a log-log plot, where the X-axis represents the width of the dilation buffer and the Y-axis represents the corresponding number of built clusters."
 - MorphoLim - 1.0** (Application Window)
 - Step 1 : cluster count
 - Shapefile: /home/cecile/Documents/00Data/bati_au_fc_UrbDelim/bati_besac_au.shp
 - Start radius: 1
 - Coef: 1.2
 - Buffer precision: 8
 - Start button
 - Table of results:
- Page Footer:** http://www.spatial-modelling.info/-Spatial-analysis-tools-

Publications scientifiques réalisées dans le cadre du projet

Articles dans des revues et chapitres d'ouvrage

FRANKHAUSER P., TANNIER C., VUIDEL G., HOUOT H. (à paraître), Une approche multi-échelle pour le développement résidentiel des nouveaux espaces urbains, in J.-P. Antoni (Ed) *Modéliser la ville. Forme urbaine et politiques de transport*, Economica, Coll. Méthodes et approches.

TANNIER C., THOMAS I., VUIDEL G., FRANKHAUSER P. (à paraître). A fractal approach to identifying urban boundaries, *Geographical Analysis*.

TANNIER C., VUIDEL G., FRANKHAUSER P., HOUOT H. (2010), Simulation fractale d'urbanisation - MUP-city, un modèle multi-échelle pour localiser de nouvelles implantations résidentielles, *Revue internationale de géomatique*, 20(3), 303-329.

TANNIER C. (2009), Formes de villes optimales, formes de villes durables. Quelques réflexions à partir de l'étude de la ville fractale, *Espaces et sociétés*, n°138, pp. 153-171.

TANNIER C. (2009), *L'agglomération de Besançon a-t-elle une limite ?*, *Images de Franche-Comté*, n°39, Association pour la cartographie et l'étude de la Franche-Comté, Université de Franche-Comté et Conseil régional de Franche-Comté, pp.6-9.

Conférences et séminaires en milieu scientifique et universitaire

FRANKHAUSER P., TANNIER C., HOUOT H., VUIDEL G. (2009), Optimizing the accessibility to different kinds of amenities by a new multiscale approach for sustainable urban planning. 16th European Colloquium on Theoretical and Quantitative Geography, Maynooth-Ireland, 4-8 September 2009.

FRANKHAUSER P., TANNIER C., (2009). Vers un aménagement fractal durable : MUP-city". 9^{ème} séminaire "Méthodes et approches" : la modélisation transport/urbanisme. Séminaire PREDIT4 et ANR, Paris, 2009.

FRANKHAUSER P., TANNIER C., HOUOT H., VUIDEL G. (2010), *Multiskalare Raumplanung – Ein neues Konzept zur nachhaltigen Entwicklung von Ballungsräumen*, Technische Universität Wien, Department für Raumentwicklung, Infrastruktur und Umweltplanung.

FRANKHAUSER P., TANNIER C., HOUOT H., VUIDEL G. (2010), *Multiskalare Raumplanung – Ein neues Konzept zur nachhaltigen Entwicklung von Ballungsräumen*, Technische Universität Wien, Department für Raumentwicklung, Infrastruktur und Umweltplanung, 22 janvier 2010.

FRANKHAUSER P., TANNIER C., VUIDEL G., HOUOT H. (2010), Du concept à l'application : une approche multi-échelle pour maîtriser l'étalement urbain et l'outil d'aide à la décision « MUP-city », *Colloque de l'ASRDLF Identité, Qualité et Compétitivité Territoriale*, 20 – 22 septembre 2010, Aoste (Italie).

FRANKHAUSER P., TANNIER C., VUIDEL G., HOUOT H. (2010), Développer des scénarios d'aménagement multi-échelles pour maîtriser l'étalement urbain. Du concept à l'application : l'outil d'aide à la décision MUP-city, *WCTR 2010 - 9^{èmes} rencontres francophones Est-Ouest de socio-économie des transports*, 12 – 15 juillet 2010, Lisbonne (Portugal).

FRANKHAUSER P. (2009), *Multi-scale urban planning and city sustainability: theoretical reflexions*, Workshop MODUS (Modelling Urban Space) "Multi-scale interactions between urban forms and processes (mobilities, accessibilities): how to model sustainable spatial structures?", ERG S4, 4th of Jun 2009, Besançon.

HOUOT H., TANNIER C., VUIDEL G. FRANKHAUSER P. (2009), Multi-scale scenarios of urban residential development and accessibility to retail stores and facilities. 16th European Colloquium on Theoretical and Quantitative Geography, Maynooth-Ireland, 4-8 September 2009.

TANNIER C., VUIDEL G., FRANKHAUSER P., HOUOT H. (2008), An urban multi-scale simulation tool using fuzzy evaluation of accessibility and morphological constraints, *48th Congress of the European Regional Science Association - 27-31 August 2008 – Liverpool, UK*. <http://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-00461295/fr/>

TANNIER C., (2008). "MUP-City : Multi-scale urban planning for a sustainable city". Séminaire PREDIT. Paris, 19 décembre 2008.

TANNIER C. (2009), *Multi-scale urban planning and city sustainability: application*, Workshop MODUS (Modelling Urban Space) "Multi-scale interactions between urban forms and processes (mobilities, accessibilities): how to model sustainable spatial structures?", ERG S4, 4th of Jun 2009, Besançon.

Conférences et séminaires hors milieu scientifique et universitaire

FRANKHAUSER P., TANNIER C., CZEKKAUER C., VUIDEL G. (2010), *Multiskalare Raumplanung – Ein Konzept zur nachhaltigen Entwicklung von Ballungsräumen*, Vortrag auf Einladung des Stadtplanungsamtes der Stadt Wien, Österreich, (Présentation sur invitation auprès des services d'aménagement de la ville de Vienne, Autriche), 9 septembre 2010.

Conclusion - Perspectives

Conclusion

Le projet de recherche a répondu à un double objectif : la validation du concept d'aménagement développé dans le cadre d'un précédent contrat, et le développement d'un outil d'aide à la décision. La démarche choisie a combiné ces deux aspects à travers le développement de MUP-City, qui permet à la fois de réaliser des tests méthodologiques et de créer de manière interactive des scénarios de développement résidentiel fractals. Cet outil est conçu selon une architecture originale qui intègre différentes approches issues de l'intelligence artificielle. Le développement de cet outil a nécessité l'élaboration de méthodes particulières, telles que la constitution d'agrégats commerciaux, ainsi que la réalisation de tests de sensibilité par rapport à la variation des paramètres du modèle.

Les comparaisons réalisées entre différents types de scénarios de développement fractals et non-fractals ont montré l'intérêt du concept proposé pour la structuration de zones périurbaines, notamment en ce qui concerne l'accessibilité des résidents à différents types d'aménités. Le concept proposé permet de limiter l'étalement urbain tout en évitant une densification uniforme qui ne semble pas répondre à la demande sociale de la population ayant choisi de s'installer dans ces espaces.

L'outil d'aide à la décision est bien adapté à l'élaboration de scénarios de développement à l'échelle de zones périurbaines de villes moyennes. À travers les informations mises à disposition de l'utilisateur, l'accessibilité à des lieux fréquentés tels que les services et commerces est directement prise en compte. Il est également possible d'intégrer l'accès aux stations de transport en commun, ce qui représente un enjeu important en matière d'aménagement, notamment pour accéder aux centres de services et commerce de niveaux supérieurs. Mais il est aussi possible d'étudier l'impact de l'implantation de services et commerces à proximité des stations. Ces informations peuvent s'avérer utile lors de l'élaboration des Plans de déplacements urbains.

La logique fractale et les règles morphologiques introduites assurent la préservation de zones non-bâties contigües ce qui s'inscrit parfaitement dans la logique des trames vertes et bleues, concept très présent dans le débat de l'aménagement à l'échelle internationale [Fabo & Ryan, 2006; Linehan et al., 1995; von Haaren & Reich, 2006] et récemment mis en avant dans le cadre du « Grenelle de l'Environnement » qui prévoit notamment « l'élaboration des trames vertes et bleues devant permettre de créer un maillage écologique du territoire »⁸.

MUP-City oblige aussi à travailler sur une variété d'échelles et à développer ainsi un raisonnement trans-échelles. Ceci représente une approche jusqu'ici peu présente dans l'aménagement, mais par ailleurs importante, notamment lors de l'élaboration de schémas de cohérence territoriale (SCOT). Cette approche s'affranchit de la logique du zonage classique ce qui peut apporter un élément intéressant lors de l'élaboration de Plans locaux d'urbanisme pour une prise en compte plus globale de l'espace à l'échelle communale.

Le projet a aussi permis d'enrichir les méthodes d'analyses morphologiques basées sur une approche fractale des réseaux. Ces méthodes permettent d'étudier des propriétés topologiques des réseaux de transport à travers les échelles telles que leur connectivité ou l'allongement des tracés, et leur performance, ce qui est intéressant dans le cadre du concept d'aménagement adopté qui cherche à éviter la construction de nouveaux axes routiers. Toutefois l'utilisation de ces méthodes pour une évaluation concrète doit encore être développée.

⁸ http://www.legrenelle-environnement.fr/grenelle-environnement/IMG/pdf/maires_fiche_biodivagri_v1.pdf

Perspectives

Différentes pistes s'ouvrent pour compléter et élargir le champ d'application du concept d'aménagement. Actuellement l'accessibilité aux services et commerces est évaluée à travers des distances sur le réseau routier. C'est uniquement à travers la création potentielle de commerces et services dans des haltes ferroviaires qu'une infrastructure de transports en commun a été intégrée dans les évaluations. Dans l'objectif d'un développement durable, il serait utile d'intégrer directement dans les évaluations ex-ante (règles d'accessibilité) le recours aux transports en commun. Une telle démarche paraît essentiellement intéressante pour les services et commerces de niveau supérieur, le niveau 1 étant évalué à travers des distances qui correspondent à la marche à pied. Différentes pistes paraissent possibles. On pourrait considérer l'accès piéton à un arrêt de transport en commun de haut niveau (métro, RER, TER) comme critère d'évaluation *a priori* car il améliore l'accessibilité à de nombreux lieux à l'échelle d'une agglomération. Une évaluation plus concrète prendrait en compte les accessibilités par transport en commun aux agrégats qui concentrent des services, commerces et d'autres aménités de niveau supérieur. Dans ce cas, il conviendrait de s'intéresser au temps d'accès plutôt qu'à la distance physique ce qui exige l'intégration de données sur les temps de parcours.

Il est aussi prévu d'introduire une évaluation plus nuancée qui renseigne l'utilisateur de façon aussi efficace que pour les services et commerces sur l'accès aux zones naturelles. En outre, il serait souhaitable de développer et d'intégrer des mesures de qualité environnementale.

Toutefois, plus on prend en compte des critères supplémentaires dans les évaluations, plus la question se pose du poids relatifs affecté à chaque critère. On pourrait envisager de donner à l'utilisateur la possibilité de faire varier ces poids, car il s'agit finalement de priorités qui sont liées à des stratégies d'aménagement.

Par ailleurs il serait utile de recourir aux diverses méthodes d'analyses fractales des réseaux déjà explorées dans le cadre du projet pour évaluer la cohérence entre la répartition des branches d'un réseau et les préconisations de développement résidentiel issues de MUP-city.

Ajoutons que dans un contexte plus intra-urbain que périurbain, l'identification des surfaces de la voirie comme surface construite mais inhabitée paraît également possible.

Un autre objectif est l'élargissement conceptuel de l'approche pour pouvoir développer des scénarios à l'échelle de plus grandes agglomérations. Ceci nécessite une réflexion sur les distances optimales entre centres urbains secondaires, l'intégration explicite du réseau de transport en commun et l'élaboration de normes concernant le développement démographique souhaitable pour les communes appartenant aux différents niveaux de services et commerces.

Si on travaille sur des zones plus étendues, il paraît également nécessaire de ne plus se limiter à la simple occupation du sol, mais d'intégrer une modélisation multifractale d'un espace urbain en 3D. Une telle réflexion permettrait de reprendre l'idée d'une baisse radiale de la densité à partir d'un centre, mais sans que cette baisse ne soit monotone. Ceci permettrait d'éviter l'uniformité de certaines zones pavillonnaires et d'intégrer plus facilement différents types de logements (individuel, collectif, social). Ceci serait possible en combinant dans chaque maille différentes intensités locales d'occupation du sol. En certains lieux, l'intensité d'occupation du sol pourrait donc être plus élevée, par exemple à proximité d'un nœud du réseau de transport qui concentre des services et commerces et qui est un point d'interconnexion important pour les réseaux TC. Ceci n'exclut pas que cette zone contienne une diversité de bâtiments.

Le recours à une logique multifractale permettrait également de modifier la taille des cellules et de s'approcher ainsi davantage d'une logique parcellaire qui permettrait de diversifier la taille des bâtiments.

Références bibliographiques

- Aerts J., van Herwijnen M., Janssen R., Stewart T. (2005). Using genetic algorithms and simulated annealing for solving a multi site land use allocation problem. *Journal for Environmental Management and Planning*, 48, 121-142.
- Aguilera A. (2005). Growth in commuting distances in French polycentric metropolitan areas: Paris, Lyon, Marseille. *Urban studies*, 42(9), 1537-1547.
- Alberti M. (2005). The Effects of Urban Patterns on Ecosystem Function. *International Regional Science Review*, 28(2), 168-192.
- Antoni J. (2006). Calibrer un modèle d'évolution de l'occupation du sol urbain. L'exemple de Belfort. *Cybergeo : revue européenne de géographie*, 347, URL : <http://www.cybergeo.eu/index2436.html>. Consulté le 09 octobre 2009.
- Apparicio P., Seguin A. (2006). Measuring the accessibility of services and facilities for residents of public housing in Montréal. *Urban studies*, 43(1), 187-211.
- Arentze T., Borgers A., Timmermans H. (2006). A Heuristic Method for Land-Use Plan Generation in Planning Support Systems. In *Progress in Design & Decision Support Systems in Architecture and Urban Planning*. Eindhoven, NL.
- Arlinghaus S. L., Nystuen J. D. (1990). Geometry of Boundary Exchanges. *Geographical Review*, 80(1), 21-31.
- Banister D. (1992). Energy use, transportation and settlement patterns. In M. J. Breheny (Ed.), *Sustainable Development and Urban Form* (pp. 160-181).
- Barnsley M. (1988). *Fractals Everywhere*. New York: Academic Press.
- Batty M. (2005). *Cities and Complexity: Understanding Cities with Cellular Automata, Agent-Based Models, and Fractals*. Hardcover, The MIT Press.
- Batty M., Longley P. (1986). The fractal simulation of urban structure. *Environment and Planning A*, 18, 1143-1179.
- Batty M., Longley P. A. (1994). *Fractal cities: A Geometry of Form and Function*. London: Academic Press.
- Batty M., Xie X. (1999). Self-organized Criticality and Urban Development. *Discrete Dynamics in Nature and Society*, 3, 109-124.
- Batty M., Xie Y. (1996). Preleminary evidence for a theory of the fractal city. *Environment and Planning A*, 28, 1745-1762.
- Benguigui L., Blumenfeld E., Czamanski D. (2006). The dynamics of the Tel Aviv morphology. *Environment and Planning B*, 33, 269-284.
- Benguigui L., Czamanski D. (2004). Simulation Analysis of the Fractality of Cities. *Geographical Analysis*, 36(1), 69-84.
- Benguigui L., Czamanski D., Marinov M., Portugali Y. (2000). When and where is a city fractal?. *Environment and Planning B*, 27(4), 507-519.
- Breheny M. J. (1997). Urban compaction: feasible and acceptable?. *Cities*, 14, 209-217.
- Brueckner, J. (2000). Urban sprawl: diagnosis and remedies. *International Regional Science Review*, 23, 160-171.
- Burton E. (2000). The compact city: just or just compact?. *Urban Studies*, 37(11), 1969-2001.
- Calthorpe P. (1993). *The next American metropolis: ecology, community, and the American dream*. New York: Princeton Architectural Press.
- Camagni R., Gibelli M., Rigamonti P. (2002). Urban mobility and urban form: the social and environmental costs of different patterns of urban expansion. *Ecological Economics*, 40, 199– 216.
- Cavaillhès J., Frankhauser P., Peeters D., Thomas I. (2004). Where Alonso meets Sierpinski: an urban economic model of fractal metropolitan area. *Environment and Planning A*, 36, 1471-1498.
- Cervero R., Murakami J. (2010). Effects of built environment on vehicle miles traveled: evidence from 370 US urbanized areas. *Environment and planning A*, 42, 400-418.
- Conway T. (2009). Local environmental impacts of alternative forms of residential development. *Environment & Planning B*, 36(5), 927-943.
- Cromley R., Hanink D. (1999). Coupling land use allocation models with raster GIS. *Journal of Geographical Systems*, 1, 137-153.
- Dantzig G., Saaty T. (1973). *Compact City: a Plan for a Liveable Urban Environment*. San Francisco: Freeman.
- Davoudi S. (2003). Polycentricity in European spatial planning: from an analytical tool to a normative agenda. *European Planning Studies*, 11(8), 979-999.
- De Keersmaecker M., Frankhauser P., Thomas I. (2003). Using Fractal Dimensions for characterizing intra-urban diversity. The example of Brussels. *Geographical Analysis*, 35(4), 310-328.

- Evans A. (1991). Rabbit hutches on postage stamps: planning, development and political economy. *Urban studies*, 28, 853-870.
- Ewing R. (1997). Is Los Angeles-style sprawl desirable? *Journal of the American Planning Association*, 63(1), 107-126.
- Fabo J., Ryan R. (2006). An introduction to greenway planning around the world. *Landscape and Urban Planning*, 76, 1-6.
- Fotheringham A. S., Batty M., Longley P. A. (1989). Diffusion-limited aggregation and the fractal nature of urban growth. *Papers of the Regional Science Association*, 67, 55-69.
- Frankhauser P. (1988). Fractal aspects of urban systems. In *Sonderforschungsbereich 230 "Naturliche Konstruktionen"* (pp. 67-76).
- Frankhauser P. (1994). *La fractalité des structures urbaines*. Paris: Anthropos.
- Frankhauser P. (1997). L'approche fractale. Un outil de réflexion dans l'analyse spatiale des agglomérations urbaines. *Population*, 4, 1005-1040.
- Frankhauser P. (2000). La fragmentation des espaces urbains et périurbains : une approche fractale. In P.H. Derycke (Ed.), *Structure des villes, entreprises et marchés urbains* (pp. 25-50). Paris: Harmattan.
- Frankhauser P. (Dir.) (2003). *Morphologie des villes émergentes en Europe à travers les analyses fractales*. Rapport de recherche pour le Ministère de l'Equipement. Chef de projet : G. Dubois-Taine.
- Frankhauser P. (2004). Comparing the morphology of urban patterns in Europe: a fractal approach. In A. Borsdorf & P. Zembri (Eds.), *European Cities - Insights on outskirts* (pp. 79-105). Brussels.
- Frankhauser P. (Dir.), Houot H., Tannier C., Vuidel G. (2007a). *Vers des déplacements péri-urbains plus durables : proposition de modèles fractals opérationnels d'urbanisation*. Rapport final, PREDIT (Programme français de recherche et d'innovation dans les transports terrestres).
- Frankhauser P., Genre-Grandpierre C. (1998). La géométrie fractale: un nouvel outil pour évaluer le rôle de la morphologie des réseaux de transport public dans l'organisation spatiale des agglomérations. *Les cahiers scientifiques du transport*, (33), 41-78.
- Frankhauser P., Tannier C., Vuidel G., Houot H. (2007b). Approche fractale de l'urbanisation - Méthodes d'analyse d'accessibilité et simulations multi-échelles. In *11th World Conference on Transportation Research*. Berkeley, USA.
- Geoghegan J. (2002). The value of open spaces in residential land use. *Land Use Policy*, 19, 91-98.
- Geurs K. T., van Wee B. (2006). Ex-post evaluation of thirty years of compact urban development in the Netherlands. *Urban studies*, 43(1), 139-160.
- Hall P. (1997). The Future of the Metropolis and its Form. *Regional Studies*, 31(3), 211-220.
- Jankowski P. (1995). Integrating geographical information systems and multiple criteria decision-making methods. *International Journal of Geographical Information Systems*, 9, 251-273.
- Janssen R., van Herwijnen M., Stewart T., Aerts J. (2008). Multiobjective decision support for land-use planning. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 35, 740-756.
- Johnson M. (2001). Environmental impacts of urban sprawl: a survey of the literature and proposed research agenda. *Environment and Planning A*, 33, 717-735.
- Katz P. (1994). *The New Urbanism: toward an architecture of community*. New York: McGraw Hill.
- Klosterman R. (1999). The What if? collaborative planning support system. *Environment and planning B: Planning and design*, 26, 393-408.
- Li X., Liu X. (2008). Embedding sustainable development strategies in agent-based models for use as a planning tool. *International Journal of Geographical Information Science*, 22(1), 21-45.
- Ligmann-Zielinska A., Church R. L., Jankowski P. (2008). Spatial optimization as a generative technique for sustainable multiobjective land-use allocation. *International Journal of Geographical Information Science*, 22(6), 601-622.
- Linehan J., Gross M., Finn J. (1995). Greenway planning: developing a landscape ecological network approach. *Landscape and Urban Planning*, 33, 179-193.
- Longley P. A., Mesev V. (2000). On the measurement and generalisation of urban form. *Environment and Planning A*, 32(3), 473-488.
- Longley P., Batty M. (1989). On the Fractal Measurement of Geographical Boundaries. *Geographical Analysis*, 21(1), 47-67.
- Ma, L., Arentze, T., Borgers A., Timmermans H. (2006). A multi-agent model for generating local land-use plans in the context of an urban planning support system. In *Progress in Design & Decision Support Systems in Architecture and Urban Planning*.

- Malczewski J. (1999). *GIS and Multicriteria Decision Analysis*. New York: John Wiley and Sons.
- Malczewski J. (2004). GIS-based land-use suitability analysis: a critical overview. *Progress in Planning*, 62(0), 3–65.
- Mandelbrot B. (1982). *The fractal geometry of nature*. San Francisco: Freeman.
- Newman P., Kenworthy J. (1989). *Cities and Automobile Dependence*. Gower Publishing.
- Niang M., Soboyejo W. (2006). On the Use of Quasi-crystal and Fractal Concepts in the Design of Affordable Rural/Urban Landscapes. *Perspectives on Global Development and Technology*, 5(4), 411-421.
- Owens S. (1992). Land-use planning for energy efficiency. *Applied Energy*, 43, 81-114.
- Saarlos D., Arentze T., Borgers A., Timmermans H. (2005). A multiagent model for alternative plan generation. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 32, 505-522.
- Schwanen T., Dieleman F., Dijst M. (2003). Car Use in Netherlands Daily Urban Systems: Does Polycentrism Result in Lower Commute Times? *Urban geography*, 24(5), 410-430.
- Shen G. (2002). Fractal dimension and fractal growth of urbanized areas. *International Journal of Geographical Information Science*, 16(5), 437–519.
- Stamps A. E. (2002). Fractals, skylines, nature and beauty. *Landscape and urban planning*, 60(3), 163-184.
- Stanley E. (1986). Form: an introduction to self-similarity and fractal behavior. In E. Stanley & N. Ostrowski (Eds.), *On Growth and Form - Fractal and Non-Fractal Patterns in Physics* (pp. 21-53). Dordrecht: Martinus Nijhoff Publishers.
- Stewart T. J., Janssen R., van Herwijnen M. (2004). A genetic algorithm approach to multiobjective land use planning. *Computers and Operations Research*, 311, 2293-2313.
- Tannier C. (2009a). L'agglomération de Besançon a-t-elle une limite ? *Images de Franche-Comté*, (39), 6-9.
- Tannier C. (2009b). Formes de villes optimales, formes de villes durables. Quelques réflexions à partir de l'étude de la ville fractale. *Espaces et sociétés*, 3(138), 153-171.
- Tannier C., Pumain D. (2005). Fractals in urban geography: a theoretical outline and an empirical example. *Cybergeo: European Journal of Geography*, 307, Online.
- Tannier C., Thomas I., Vuidel G., Frankhauser P. (forthcoming). A fractal approach to identifying urban boundaries. *Geographical Analysis*.
- Tannier C., Vuidel G., Frankhauser P., Houot H. (2010). Simulation fractale d'urbanisation - MUP-city, un modèle multi-échelle pour localiser de nouvelles implantations résidentielles. *Revue internationale de géomatique*, 20(3), 303-329.
- Thomas I., Frankhauser P., Biernacki C. (2008a). The morphology of built-up landscapes in Wallonia (Belgium): A classification using fractal indices. *Landscape and Urban Planning*, 84, 99–115.
- Thomas I., Frankhauser P., De Keersmaecker M. (2007). Fractal dimension versus density of the built-up surfaces in the periphery of Brussels. *Papers in Regional Science*, 86(2), 287-307.
- Thomas I., Tannier C., Frankhauser P. (2008b). Is there a link between fractal dimension and residential environment at a regional level? *Cybergeo: European Journal of Geography*, 413, Online.
- Verburg P., Schot P., Dijst M., Veldkamp A. (2004). Land use change modelling: current practice and research priorities. *GeoJournal*, 61, 309–324.
- Vogt C. A., Marans R. W. (2004). Natural resources and open space in the residential decision process: a study of recent movers to fringe counties in southeast Michigan. *Landscape and Urban Planning*, 69, 255–269.
- Von Haaren C., Reich M. (2006). The German way to greenways and habitat networks. *Landscape and Urban Planning*, 76, 7–22.
- White R. (2006). Modeling Multi-scale Processes in a Cellular Automata FrameworkCollection. In J. Portugali (Ed.), *Complex Artificial Environments. Simulation, Cognition and VR in the Study and Planning of Cities, Part three* (pp. 165-177). Springer Berlin Heidelberg.
- White R., Engelen G. (1993). Cellular automata and fractal urban form: a cellular modelling approach to the evolution of urban land-use patterns. *Environment and Planning A*, 25(8), 1175-1199.
- White R., Engelen G., Uljee I. (1997). The use of constrained cellular automata for high-resolution modelling of urban land use dynamics. *Environment and Planning B*, 24, 235-246.
- Yager R. R. (1978). Fuzzy decision making including unequal objectives. *Fuzzy sets and systems*, 1, 87-95.
- Zadeh L. A. (1965). Fuzzy sets. *Information and Control*, 8(3), 338-353.
- Zimmermann H. (1987). *Fuzzy sets, Decision Making and Expert Systems*. Boston [u.a.]: Kluwer Academic Publishers.
- Zimmermann H., Zysno P. (1983). Decisions and evaluations by hierarchical aggregation of information. *Fuzzy sets and systems*, 10, 243-260.