

Optimisation de l'accessibilité aux aménités urbaines et rurales à travers le développement de modèles fractals d'urbanisation

Cécile Tannier¹ (cecile.tannier@univ-fcomte.fr)

Pierre Frankhauser¹

Hélène Houot¹

Gilles Vuidel¹

¹ ThéMA UMR 6049 (CNRS – Université de Franche-Comté)
32, rue Mégevand - 25 030 Besançon Cedex - France
Tel 1: +33 381 66 54 21 - Tel 2: +33 381 66 54 81 - Fax: +33 381 66 53 55

Note : cette recherche est menée en réponse à une commande de la DRAST (Direction de la recherche et des affaires scientifiques et techniques – Ministère français de l'équipement, des transports et du logement) et du PREDIT (Programme de recherche et d'innovation dans les transports terrestres). Davantage d'informations sur le contenu de la commande sont disponibles sur Internet à l'adresse : <http://thema.univ-fcomte.fr/rubrique214.html>

0. Introduction

Depuis plusieurs dizaines d'années, les spécialistes de l'aménagement des villes (praticiens ou chercheurs) réfléchissent aux moyens de réduire les conséquences néfastes du processus d'étalement urbain, notamment l'augmentation du nombre et de la longueur des déplacements. Dans cet objectif, de nombreux auteurs ont fait (ou font encore) la promotion du modèle de la ville compacte, mettant en avant le fait qu'il favorise l'utilisation des transports publics, permet une bonne accessibilité aux commerces et services et réduit la ségrégation sociale, par exemple (Dantzig & Saaty, 1973) (Newman & Kenworthy, 1989 et 1992). Inversement, les limites du modèle de la ville compacte, notamment la hausse des prix des logements, la congestion des axes routiers, une réduction de l'accès aux espaces verts et naturels, ont été largement discutées (Banister, 1992), (Breheny, 1992 et 1997), (Owens, 1992).

Au-delà du débat traditionnel entre ville compacte et ville étalée, une part importante des réflexions engagées s'attachent à améliorer la connaissance des interactions entre formes urbaines et pratiques spatiales des individus. La grande majorité des recherches s'inscrivant dans ce champ d'investigation (voir la revue de la littérature sur le sujet effectuée par Crane en 1999), consistent en une exploration des relations statistiques susceptibles d'exister entre diverses variables relatives :

- aux formes urbaines (densité du bâti, propriétés du réseau en termes de connectivité et de connectivité, organisation spatiale des lieux de résidence, d'emploi et de services, accessibilité relative des lieux, qualité paysagère...),
- aux caractéristiques sociales des individus (sexe, âge, revenus, nombre et âge des enfants...),
- aux déplacements effectués (buts des déplacements, mode de transport adopté, fréquence des déplacements, longueur en distance ou en temps...).

La recherche que nous présentons poursuit ce même objectif général de meilleure compréhension des interactions entre formes urbaines et pratiques spatiales. Cependant, la démarche adoptée, à la fois déductive et expérimentale¹, est assez différente de celles habituellement rencontrées dans ce domaine.

En premier lieu, précisons que nous nous intéressons aux pratiques spatiales possibles (ou potentielles) et non aux pratiques observées. En effet, la recherche s'appuie sur des mesures d'accessibilité, les déplacements des individus n'étant dès lors pas directement pris en compte.

¹ Nous considérons que l'expérimentation en sciences sociales est possible via la simulation.

L'hypothèse centrale de la recherche est qu'un tissu urbain organisé selon une logique d'emboîtement d'échelles² permet une meilleure accessibilité à la fois, aux aménités urbaines offertes par la ville centre et les pôles d'attractivité secondaires (bourgs centres par exemple), et aux aménités rurales (accès direct visuel et physique aux espaces naturels ou agricoles), tout en minimisant la fragmentation des espaces non bâtis. D'un point de vue économique, cet aspect a notamment été étudié dans (Cavailhès et al., 2004). Le caractère multi-échelle d'un tissu urbain est défini comme le résultat de la combinaison de deux composantes de même importance : une hiérarchie dans la taille des agrégats bâtis et une répartition spatiale non uniforme des bâtiments à travers les échelles.

L'hypothèse posée est issue de la confrontation d'un ensemble d'observations et de réflexions relatives au processus d'urbanisation. Citons d'abord le fait que, suite à la motorisation des ménages, les tissus bâtis urbains sont devenus plus homogènes et moins contrastés, surtout quand on les observe à différentes échelles spatiales (Frankhauser, 1998). Cette plus grande uniformité dans la distribution spatiale du semis des bâtiments se manifeste notamment dans les espaces périurbains. Elle s'explique par l'amélioration progressive du réseau routier, qui a rendu possible une périurbanisation quasi uniforme quelle que soit l'échelle spatiale considérée. Ceci a été mesuré pour Berlin, Munich, Strasbourg, la Ruhr et Montbéliard (Frankhauser, 2003) et, plus récemment pour Bâle (Tannier & Pumain, 2005). Explorant une autre dimension du phénomène d'urbanisation, M. Batty a abouti au constat que, depuis le 19^{ème} siècle, le processus de croissance urbaine a donné naissance à des formes d'organisation spatiale du bâti qui sont hiérarchisées et polynucléaires. Considérant le processus d'étalement urbain, M. Batty précise que : "*although next events do deviate from the long-term pattern at any point in time these are never sufficient to set the system on a new trajectory*" (Batty, 2001). Cette affirmation mène à des commentaires différents, en fonction de l'éclairage apporté. D'une part, on peut la raccrocher au fait que l'existence de tissus bâtis pas ou peu hiérarchisés ne concerne pas la totalité d'une agglomération. D'autre part, on comprend que la perte du caractère hiérarchique de certains tissus urbains (ou plutôt, périurbains) ne débouche pas forcément sur des modifications profondes de l'organisation spatiale à l'échelle des agglomérations.

Considérant notre hypothèse, agir sur la forme pour influencer le fonctionnement urbain consiste à introduire davantage de hiérarchie dans les tissus urbains pour améliorer l'accessibilité à diverses aménités. La voie proposée pour y parvenir est d'appliquer des modèles fractals d'urbanisation, en vue de déterminer où ouvrir de nouveaux espaces à l'urbanisation et quelle forme donner à ces nouveaux espaces. Il ne s'agit pas de remettre en cause les formes d'urbanisation existantes (raser et reconstruire – proposer de nouvelles formes de quartiers ou de lotissements qui soient davantage "durables"), ni de tenter de contrer les choix résidentiels actuels (interdire la construction de maisons individuelles dans le périurbain – densifier les zones déjà bâties...). L'idée consiste à partir de l'existant et, par petites touches, au fil du temps, au fil des années, chercher à infléchir légèrement la trajectoire du système vers une plus grande diversité du semis des bâtiments à travers les échelles. Dans le cadre d'un objectif général d'amélioration de la « durabilité » des déplacements, cette approche devrait être développée conjointement à des aménagements plus directs, 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.

Outre l'optimisation des accessibilités à des aménités de nature variée (hypothèse que nous cherchons par ailleurs à vérifier), l'application de modèles d'urbanisation fractals présente par ailleurs l'intérêt de minimiser la consommation d'espace sans imposer de règles de densification, ceci en raison de la concentration locale de la masse bâtie inhérente à une forme fractale. Or, si l'augmentation de la densité bâtie est encore souvent vue comme un remède souverain à l'étalement urbain, les opérations de densification n'aboutissent en général pas aux résultats escomptés. Outre des conséquences en terme d'augmentation des coûts fonciers et immobiliers, comme en témoigne

2 Pour simplifier, nous parlerons de tissu urbain multi-échelle.

la politique de Green Belts au Royaume-Uni (Hall, 1997), les opérations de densification ne gagnent que rarement l'adhésion des populations résidentes (Fouchier, 1999). Diverses études, dont celle de Garcia et Riera (2003), ont aussi montré la plus grande préférence des individus pour de petits espaces libres individuels de proximité que pour des espaces libres plus vastes mais plus éloignés.

Une démarche de recherche en trois étapes est définie, pour confirmer ou infirmer l'hypothèse qu'une augmentation du caractère hiérarchique du tissu bâti permet d'améliorer l'accessibilité des résidents à des aménités de nature variée. Elle est appliquée sur deux zones périurbaines du périmètre du SCOT du Grand Besançon (agglomération de 120 000 habitants située dans l'est de la France).

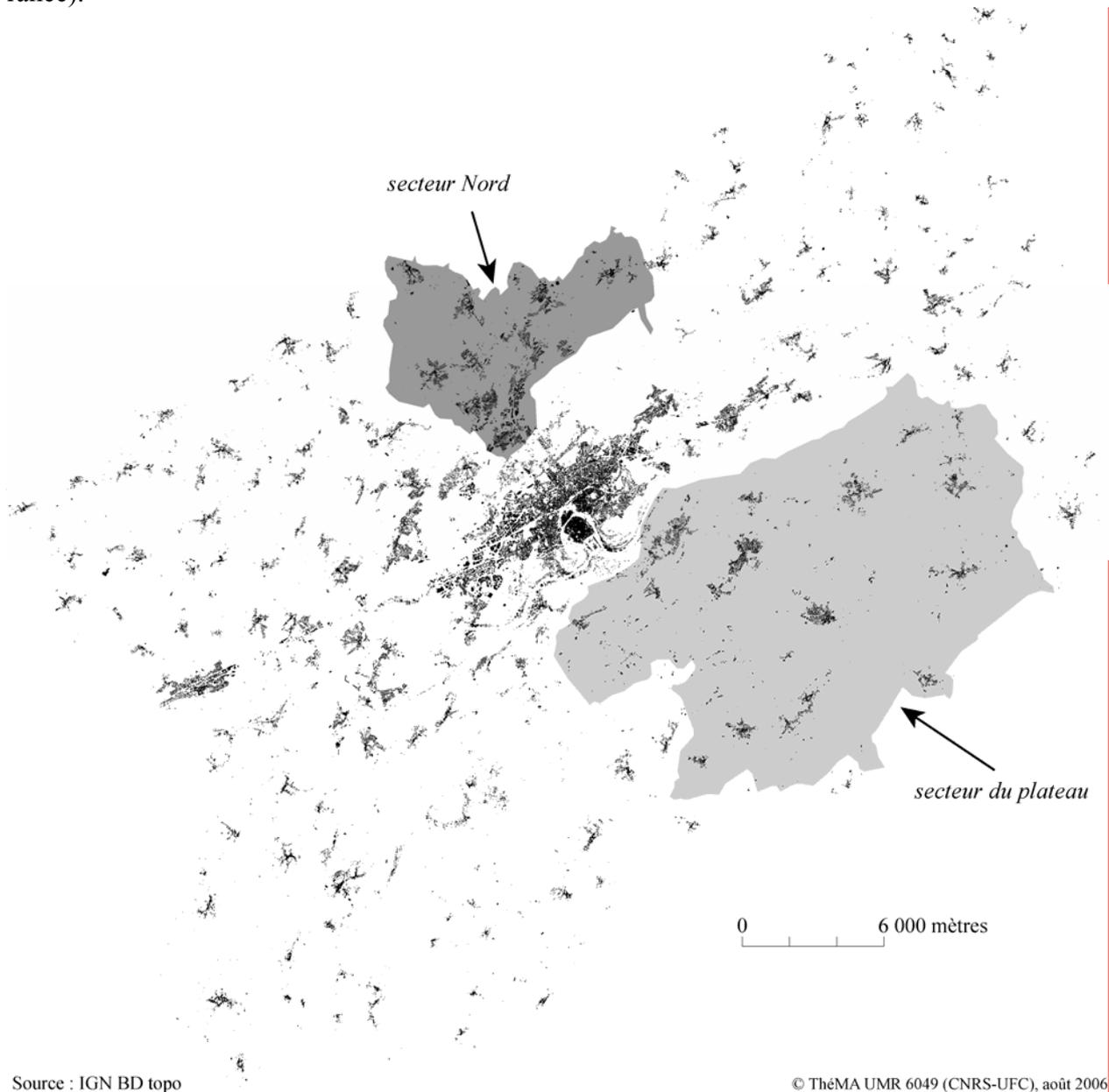


Figure 1. Localisation des deux secteurs étudiés dans l'espace bisontin

Le secteur du Plateau (zone d'attraction de Saône et Mamirolle)

Saône est un bourg centre d'environ 3 000 habitants doté d'une zone commerciale et industrielle et situé à 11 km de Besançon, sur le premier plateau du Jura. Une coupure forte due au relief et à une

zone marécageuse sépare cette zone de Besançon. De ce fait, Saône remplit la fonction d'un lieu central pour les communes environnantes, de caractère plutôt rural. La commune est reliée à Besançon par le chemin de fer et par un axe routier important. Cette accessibilité routière sera encore améliorée par la construction d'un tunnel reliant la zone au contournement de Besançon. Mamirolle est une commune localisée dans l'aire d'attraction de Saône, mais qui regroupe également un certain nombre de services et d'activités. Elle joue donc le rôle d'un bourg centre à une échelle inférieure.

L'ensemble de la zone est assez bien structuré selon une logique multi-échelle, ce qui permet d'envisager l'application relativement aisée de modèles fractals d'urbanisation.

Le secteur Nord (secteur d'Ecole-Valentin et de la future gare TGV d'Auxon)

Située à seulement 5,5 km de Besançon, à proximité d'un diffuseur d'autoroute, la commune d'Ecole-Valentin dispose d'une des zones commerciales importantes de l'agglomération bisontine. Il s'agit d'un espace très dynamique qui regroupe dans son aire d'attractivité plusieurs communes qui se sont fortement développées depuis un vingtaine d'années. La zone est traversée par une ligne de chemin de fer désaffectée pour laquelle il existe un projet de revitalisation dans le but de relier la nouvelle gare TGV à la gare de Besançon-Viotte (gare principale) : il s'agit là d'une donnée particulièrement intéressante pour développer une réflexion sur l'offre en transport public. Valentin est en principe coupé de Besançon par la « ceinture verte », mais en réalité reliée à la ville par une urbanisation plus ou moins diffuse. Récemment des aménagements routiers conséquents (contournement Ouest) ont encore réduit cette coupure. Dans la même zone se situe Miserey-Salines qui joue le rôle d'un petit bourg offrant un certain nombre de services. Beaucoup de communes dans cet espace ont connu une périurbanisation assez importante depuis quelques années, mais ont souvent gardé un aspect plutôt villageois, car peu d'activités économiques s'y sont installées. Ceci est aussi le cas pour Auxon-Dessus et Auxon-Dessous où sera implanté la future gare TGV, qui modifiera fondamentalement cet espace et son fonctionnement.

Le secteur Nord est moins clairement structuré que celui du plateau. Il a été choisi notamment pour sa forte articulation avec Besançon, la présence d'une zone commerciale qui déborde sur une commune voisine et la présence de plusieurs axes routiers. La future gare TGV rend la situation encore plus complexe. Il s'agit donc d'une zone pour laquelle l'application d'une approche structurante est d'un grand intérêt.

Le premier volet de la démarche adoptée consiste en la réalisation d'un état des lieux des accessibilités entre d'une part, les lieux de résidence des individus (*i.e.* les bâtiments à usage résidentiel), et d'autre part, les aménités urbaines (commerces et services) et rurales (enveloppe urbaine définie comme une ligne virtuelle extraite à partir des contours des éléments bâtis). Le deuxième volet s'intéresse à l'élaboration de scénarios d'aménagement fractal. La méthodologie adoptée est basée sur la décomposition fractale du tissu bâti existant, puis, sur cette base, la génération d'extensions fractales de ce tissu. Le dernier volet consiste à la vérification proprement dite de l'hypothèse par la réalisation de nouveaux calculs d'accessibilité sur les tissus bâtis correspondant à chaque scénario d'aménagement, et la confrontation des résultats avec ceux obtenus pour le tissu bâti initial.

Volet 1 : diagnostic des accessibilités et identification de potentiels d'aménagement

Ce premier volet a pour but l'identification des zones où des aménagements sont requis (mauvaise accessibilité aux aménités urbaines et rurales) et pour lesquelles il existe un potentiel d'aménagement (urbanisation possible sans destruction puis reconstruction partielle ou totale du tissu bâti existant). Le diagnostic est basé sur une série de mesures servant à caractériser :

- la fractalité du réseau et du tissu bâti, tant globale que locale (à partir de chaque commerce ou bâtiment) ;
- l'articulation entre le réseau et le bâti, en prenant comme entrée la localisation ponctuelle d'une série de commerces et services ;
- l'articulation entre le tissu bâti et les espaces verts et naturels environnants.

Volet 2 : élaboration de scénarios d'aménagement fractal

Dans un premier temps, le but est de construire un tissu bâti fractal qui soit le plus proche possible du tissu bâti réel. Pour ce faire, nous avons pris le parti de générer de manière itérative un tissu bâti théorique, sur la base de la méthode des Iterated Functions Systems (IFS) (Barnsley, 1988) : à chaque étape d'itération, de nouveaux éléments bâtis sont générés au moyen d'une transformation géométrique affine (réduction et translation) des éléments bâtis générés à l'étape précédente. En préalable de cette entreprise de génération, la décomposition fractale du tissu étudié fournit le nombre d'éléments (N) de la fractale générée et le facteur de réduction (r)³, ainsi que certaines informations sur la position des éléments (contiguïté...). Ainsi, l'étape de décomposition permet de définir une ou plusieurs IFS correspondant au tissu bâti étudié. Ensuite, la modification de ces IFS peut servir de base à des simulations prospectives. Chaque simulation consiste en un scénario d'aménagement qui définit où ouvrir de nouveaux espaces à l'urbanisation et quelle forme bâtie préconiser.

Le présent article porte essentiellement sur le volet 1 de la démarche (cf. section 2), tandis que le volet 2 est abordé uniquement sous la forme de perspectives dans la conclusion (cf. section 3). Quant au volet 3, qui correspond aux résultats thématiques proprement dits de cette recherche, il n'a à l'heure actuelle pas encore été réalisé et ne peut donc pas être présenté.

L'ensemble de la démarche repose sur l'utilisation de modèles fractals d'urbanisation (cf. section 1). Deux familles de modèles de ce type présentent un intérêt dans le contexte donné : les poussières de Fournier et les tapis de Sierpinski. Dans une optique d'aménagement, le recours à de tels modèles est particulièrement intéressant, dans le sens où l'optimalité des formes étudiées et simulées peut être directement questionnée. En effet, un modèle d'urbanisation fractal peut correspondre à un optimum répondant à la maximisation simultanée de différents critères, par exemple :

- ➔ la maximisation du nombre d'éléments dans la fractale (qui, en pratique, se traduit par le comblement des lacunes internes d'un tissu bâti, donc la densification), tout en respectant ou améliorant l'organisation multi-échelle tant du tissu bâti que des espaces libres ;
- ➔ la maximisation de l'accessibilité aux aménités "urbaines" (commerces et services), considérant différents niveaux d'analyse : très local, local, global ;
- ➔ la maximisation de l'accessibilité aux aménités "rurales" (espaces verts, naturels et de loisirs), considérant différents niveaux d'analyse.

Ce faisant, les modèles fractals d'urbanisation représentent un moyen de tester l'application de différentes règles (ou normes) d'aménagement urbain. On peut par exemple imaginer d'appliquer un modèle fractal qui maximise le nombre de contiguïtés entre :

- les espaces libres ➔ *limitation de la fragmentation des espaces verts et naturels, ce qui permet de préserver les habitats écologiques et le maintien d'une agriculture périurbaine ;*
- les espaces libres et la bordure externe de l'agglomération, ce qui a pour but d'éviter un développement trop important d'espaces libres internes à l'agglomération, mais non connectés avec les espaces verts et naturels environnants ➔ *préservation de coulées vertes reliant l'extérieur à l'intérieur de la forme générée, ce qui permet une bonne ventilation du coeur de ville ;*
- les espaces bâtis et les espaces libres ➔ *maximisation de nombre de bâtiments situés à proximité immédiate de la bordure urbaine (bonne accessibilité aux espaces verts et naturels de proximité).*

Un autre exemple de règle, qui peut être combinée à la précédente, peut être que le réseau présente un certain nombre de noeuds d'un ordre élevé, ce qui permet d'assurer une bonne accessibilité globale à des commerces ou services localisés en ces noeuds.

3 Remarque : N et r peuvent plus ou moins varier d'une étape d'itération à une autre.

Ainsi, dans le cadre de la présente recherche, les modèles d'urbanisation fractals servent non seulement à évaluer les propriétés actuelles du réseau et du tissu bâti (volet 1), mais aussi à contraindre la génération de formes fractales (*i.e.* les extensions spatiales simulées) (volet 2).

Sur le plan tant méthodologique que conceptuel, la recherche présentée comporte une grande part d'innovation relative à l'utilisation de la géométrie fractale dans une visée directement opérationnelle. Des publications antérieures avaient déjà évoqué le potentiel des fractales pour l'aménagement urbain (Frankhauser, 2003). Des éléments de réflexions plus concrets avaient aussi été proposés dans (Frankhauser & Genre-Grandpierre, 1998). Cependant ici, une démarche méthodologique complète est définie. Elle présente l'intérêt de s'appuyer sur toute une série de modèles de villes fractales, caractérisées par des propriétés bien définies en termes de fonctionnement urbain (par exemple, minimisation de l'accessibilité au centre urbain principal, maximisation des possibilités de contact entre le bâti résidentiel et les espaces verts et naturels...). Certains de ces modèles théoriques de ville ont déjà été présentés et discutés antérieurement, par exemple dans (Cavailhès *et al.*, 2004) ; d'autres sont moins connus et plus proches de la structure spatiale de villes réelles (par exemple, le tapis de Sierpinski hybride ou le schéma de Christaller modifié par introduction de distances non uniformes entre centres de différents niveaux hiérarchiques) ; d'autres encore sont complètement nouveaux.

1. Modèles fractals d'urbanisation

L'objectif de cette section est d'établir un lien entre la géométrie fractale et la réalité des agglomérations. Dans notre optique, la question fondamentale dans l'aménagement du territoire est la localisation des activités humaines, donc, de façon élémentaire, la répartition de la surface bâtie et la forme des réseaux. Ces deux éléments conditionnent en effet tant l'accessibilité aux différents lieux fréquentés par les résidents, que la préservation d'espaces naturels. Nous commencerons par introduire une modélisation géométrique des tissus urbains qui permet d'étudier la répartition de la surface bâtie et la forme des réseaux. Ensuite, nous réfléchirons aux propriétés de différents modèles de villes théoriques au regard de l'accessibilité à différents types de lieux (commerces, services, espaces verts et naturels).

Une agglomération est constituée de bâtiments. Ainsi, les éléments constitutifs de nos modèles fractals d'urbanisation sont des carrés noirs qui symbolisent les bâtiments, ou, si nous considérons des zones pavillonnaires, des carrés blancs sur lesquels sont centrés des carrés noirs de plus petite taille (*cf.* figure 2).

Considérons maintenant la disposition de plusieurs bâtiments qui composent un îlot urbain. Dans le contexte de la modélisation fractale, cette configuration spatiale élémentaire est cruciale car, si on se limite à des modèles simples (mono fractals), elle détermine l'organisation spatiale à l'échelle de l'ensemble de l'agglomération. En effet, suivant la logique fractale, l'îlot correspond au générateur d'une fractale qui reproduit à une multitude d'échelles la structure de cet îlot.

Dans l'exemple de la figure 2, nous avons disposé $N = 8$ bâtiments autour d'une place centrale vide et séparés par des voies d'accès. Si nous interprétons l'îlot comme générateur, le rapport entre la taille d'un élément l_0 et de l'îlot $l_1 = \nu \times l_0$ conditionne la construction de la fractale. En effet, lors de la prochaine étape de construction de la fractale, nous obtenons un quartier qui est constitué de $N = 8$ îlots du même type et dont la taille est $l_2 = \nu \times l_1$. La disposition des îlots les uns par rapport aux autres est la même que celle des bâtiments à l'intérieur de l'îlot. Nous générons ainsi des espaces interstitiels qui respectent le principe d'emboîtement d'échelles : une grande place centrale apparaît, ainsi que des axes de transport plus larges qui rappellent l'organisation hiérarchique du réseau de la voirie.

La poursuite de cette logique itérative permet de construire des parties de ville et, finalement, une ville théorique entière. Une telle logique de construction itérative pourrait être poursuivie jusqu'à la

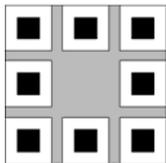
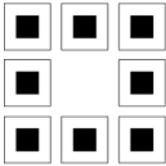
modélisation d'une aire métropolitaine ou d'un système de villes, mais elle s'arrêtera à une certaine étape.

Figure 2a

Élément : modélisation d'une maison individuelle entourée d'un jardin



Générateur (1ère étape d'itération) : modélisation d'un îlot



Sur cette représentation, les espaces libres collectifs (rue, place, square...) ont été grisés.

2ème étape d'itération : modélisation d'un quartier

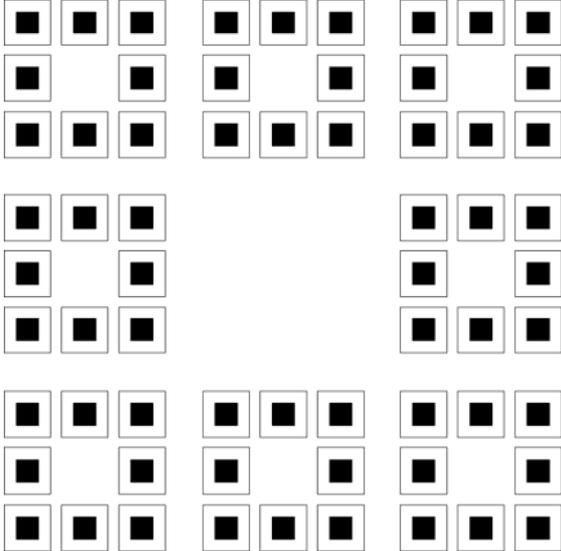
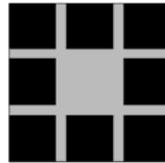


Figure 2b

Élément : modélisation d'un bâtiment

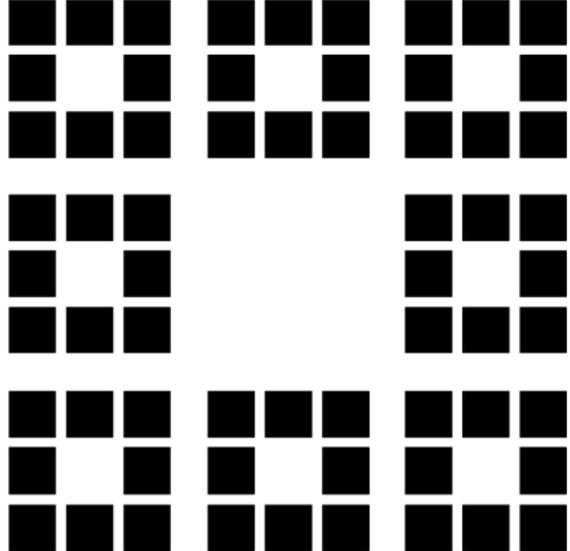


Générateur (1ère étape d'itération) : modélisation d'un îlot



Sur cette représentation, les espaces libres collectifs (rue, place, square...) ont été grisés.

2ème étape d'itération : modélisation d'un quartier



© Théma UMR 6049 (CNRS-UFC), septembre 2006

Figure 2. Du bâtiment à l'îlot, puis au quartier : représentation sous la forme de modèles fractals d'urbanisation

Le paramètre fondamental qui décrit la répartition des éléments d'un modèle fractal à travers les échelles est la dimension fractale. Dans une fractale construite telle que celle présentée en figure 2, elle est directement liée aux paramètres du générateur ν et N à travers la formule :

$$D = \frac{\log N}{\log \nu}$$

Pour un tissu urbain, la valeur de la dimension fractale caractérise le *degré de concentration* de la masse bâtie à travers les échelles en un lieu de la structure, autrement dit, le *degré de non uniformité* de la répartition de cette masse⁴. Ainsi, une valeur proche de deux caractérise une structure assez uniforme, donc faiblement hiérarchisée, tandis qu'une valeur proche de zéro caractérise une structure fortement hiérarchisée, présentant des concentrations de masse importantes en quelques endroits.

Dans le générateur de la figure 2, les éléments sont séparés par des espaces non bâtis. On appelle ce type de modèle fractal des poussières de Fournier. Il paraît surtout adapté à la description de quartiers périphériques. Mais il est aussi possible de positionner les éléments dans le modèle de telle manière qu'ils se touchent. Ceci correspond à la logique des tapis de Sierpinski, qui génèrent des structures différentes. La figure 3 offre trois exemples de tels générateurs. Les deux figures à gauche (a) et (b) correspondent en fait au même générateur ; seuls les éléments ont une forme différente ce qui n'affecte pas leurs propriétés fractales. Ces deux générateurs présentent une lacune centrale qui est isolée. En revanche, le troisième générateur (c) est différent de par ses propriétés topologiques.

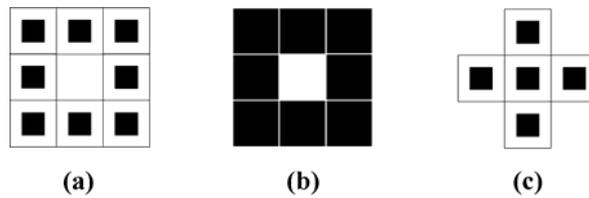


Figure 3. Trois exemples de générateurs de tapis de Sierpinski

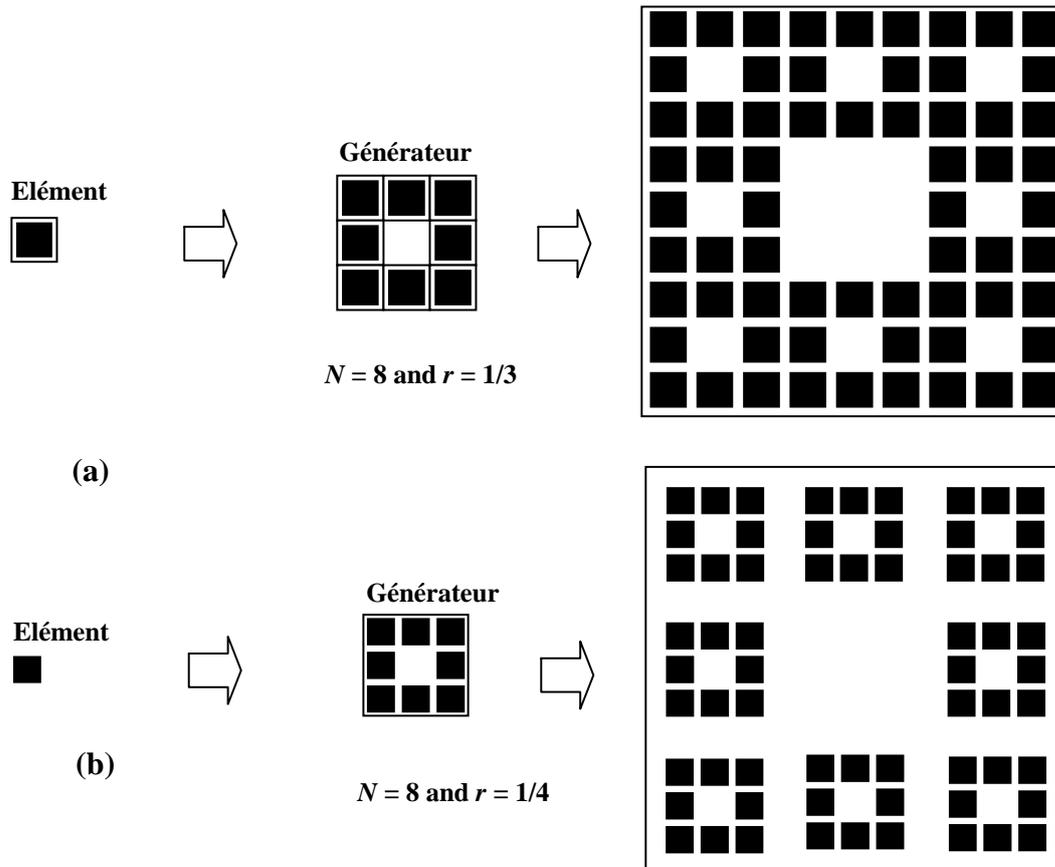


Figure 4. De faibles différences entre deux générateurs peuvent faire émerger des structures fractales très différentes

⁴ La dimension fractale décrit en effet la baisse relative de la masse bâtie en s'éloignant d'un endroit dans lequel on trouve une forte concentration de masse. Une déduction de ceci est proposée dans (De Keersmaecker *et al.*, 2004).

Sur la figure suivante, nous avons voulu illustrer le fait que deux générateurs semblant à première vue très proches font émerger des structures spatiales aux propriétés très différentes (cf. figure 4). Le générateur (a) est identique aux générateurs (a) et (b) de la figure 3 et correspond à un tapis de Sierpinski. Il génère au fil des itérations une hiérarchie de lacunes centrales. Le deuxième générateur est celui d'une poussière de Fournier (cf. figure 4b), de laquelle émerge au fil des itérations des voies de circulation organisées selon un principe d'emboîtement d'échelles, qui s'ajoute à une hiérarchie de lacunes centrales.

L'exemple suivant (cf. figure 5) combine des éléments connexes et non connexes, d'où sa dénomination de « tapis hybride ». On constate dans cette fractale l'existence d'agrégats de tailles différentes qui rappelle l'organisation hiérarchique telle qu'on la connaît de la théorie de lieux centraux. Ce modèle illustre donc plutôt une situation à l'échelle d'une agglomération, chaque élément de la fractale correspondant alors à un îlot ou un quartier et non plus à un bâtiment. Cet exemple présente une caractéristique intéressante. Supposons que les zones non construites offrent des aménités liées à leur qualité paysagère. On constate d'une part, que ces zones sont situées à proximité des zones construites et d'autre part, que les zones non construites sont connexes les unes aux autres. Ce faisant, les espaces naturels ne sont pas morcelés et sont organisés selon un principe hiérarchique : il existe de vastes espaces libres, qui peuvent par exemple correspondre à de grandes zones boisées, qui se ramifient en un nombre croissant d'espaces libres plus petits pénétrant au cœur même des zones urbanisées. Une telle articulation de zones construites et de zones naturelles protégées rappelle certains plans d'aménagements tels que ceux appliqués à Copenhague et Stuttgart (cf. figure 6).

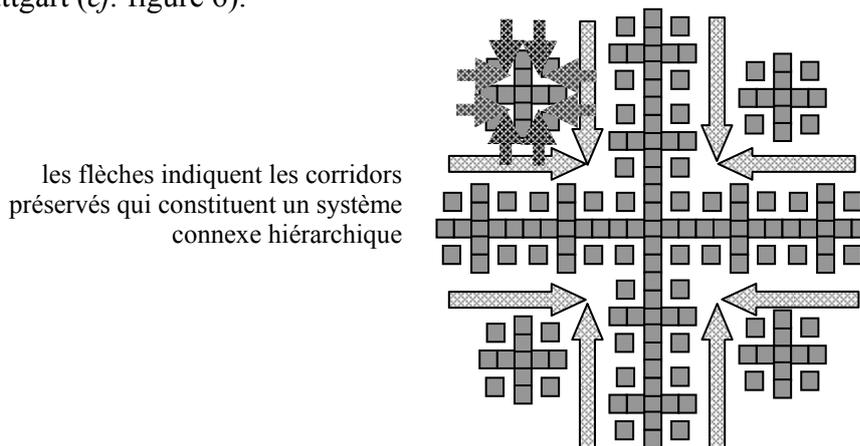


Figure 5. Un exemple de tapis de Sierpinski hybride

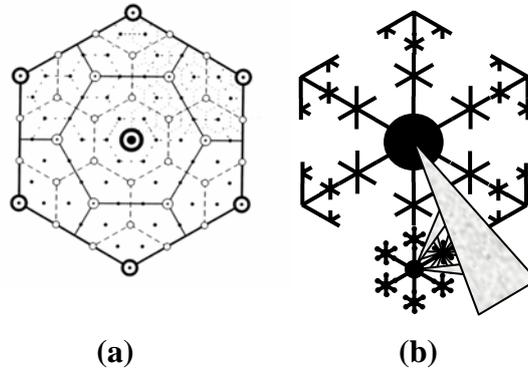


(a) Plan de Copenhague
Source : Städtebauliches Institut - Universität de Stuttgart

(b) Plan de Stuttgart
Source : (Sieverts, 1997)

Figure 6. Plans d'aménagement de Stuttgart et de Copenhague

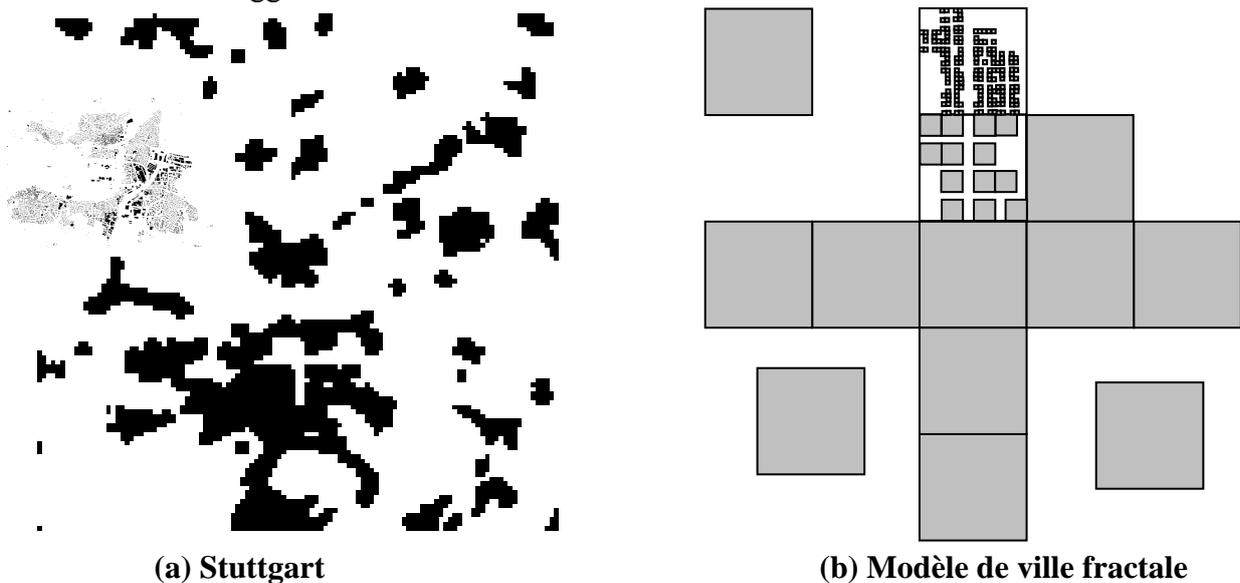
Suivant la même logique, dans la figure 7b nous avons proposé un modèle fractal qui reprend l'organisation spatiale hiérarchique cristalline (figure 7a), mais qui s'affranchit de la contrainte d'uniformité des distances entre les habitats : des espaces interstitiels non urbanisés de taille importante ont été introduits et les habitats ont été rapprochés des principaux axes de transport.



Tiré de (Frankhauser, 2005)

Figure 7. Schéma de Christaller original (a) et modifié selon une logique fractale (b)

Dans le cas d'un modèle fractal, la position des éléments dans le générateur n'en affecte pas les propriétés fractales. Il est donc possible de choisir différentes positions des éléments à chaque étape d'itération, dès lors qu'on ne modifie pas les espaces vides déjà générés lors des étapes précédentes. Dans la figure 8b nous avons modifié la position des éléments du générateur de la figure 5 à différentes échelles. A travers cet exemple, nous montrons qu'il est possible d'adapter la configuration spatiale d'un modèle fractal aux caractéristiques des différentes échelles d'une agglomération (îlot, quartier...). Nous avons représenté l'échelle détaillée des bâtiments uniquement pour une zone située au Nord. Pour la zone située juste en dessous, nous n'avons représenté que les limites des îlots et, pour le reste de la figure, nous nous sommes contentés de représenter les limites des quartiers. Nous avons accolé ce modèle à une représentation cartographique d'une agglomération pour laquelle les détails des bâtiments ne sont également représentés que pour une seule zone (figure 8a). Ceci a pour but de montrer intuitivement que les étapes d'itération d'un modèle fractal se rapprochent bien des différentes échelles spatiales de représentation d'une agglomération.



Sources : Städtebauliches Institut - Université de Stuttgart, SIG Ville de Stuttgart

Figure 8. Etapes d'itération d'un modèle fractal et échelles de représentation du tissu bâti d'une agglomération : un parallèle aisé à réaliser

Jusqu'ici nous n'avons introduit que des modèles qui servent essentiellement à illustrer et à étudier la répartition des bâtiments dans un espace donné. Cependant, les réseaux de transport, notamment la voirie, sont également importants car ils assurent la desserte des bâtiments et rendent possible les déplacements entre les lieux. Tenant compte de ceci, des caractéristiques morphologiques des réseaux autres que celles du bâti sont intéressantes à considérer. Notamment, l'interconnexion des branches d'un réseau de transport assure son opérationnalité. La modélisation fractale des réseaux s'appuie donc sur la logique des tapis de Sierpinski, dans lesquels les éléments sont connectés les uns aux autres. D'un point de vue géométrique, un réseau de transport est modélisé sous la forme d'un système de branches plus ou moins ramifié. Chaque branche du réseau peut être assez rectiligne ou plus ou moins tortueuse.

Considérons d'abord des générateurs de tapis de Sierpinski qui permettent de construire des réseaux ramifiés. La figure 9 en offre un exemple. Les éléments sont des carrés de taille l_0 traversés par un réseau défini à partir des diagonales de ces mêmes carrés. Sur cette figure, nous avons illustré de quelle manière on peut imaginer la disposition de bâtiments à l'intérieur d'un tel élément. Le réseau modélisé dessert des zones dont l'étendue est égale à l_0 . En revanche, aucune branche ne traverse ni les quatre grands carrés pointillés situés en périphérie, ni certains éléments pointillés plus petits situés à proximité des zones bien desservies. Ce réseau irrigue donc l'espace de manière inégale.

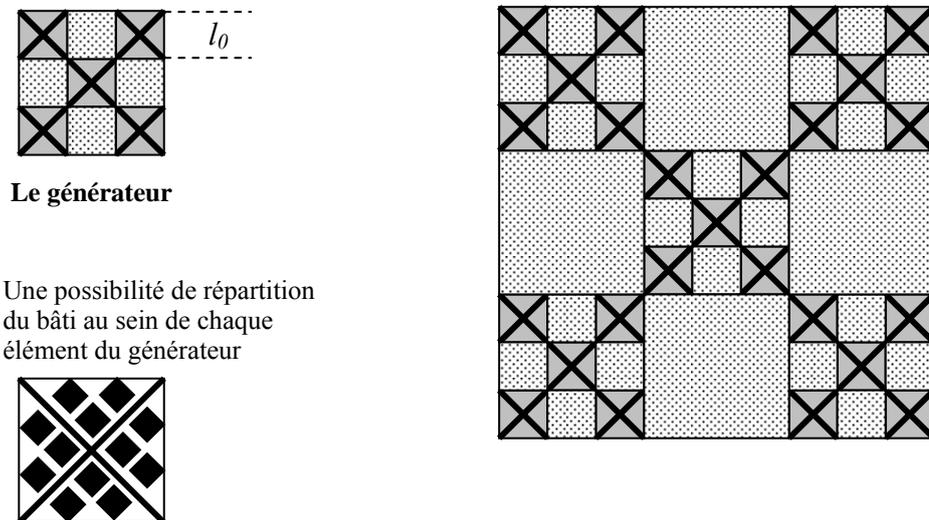


Figure 9. Du modèle fractal du bâti à celui du réseau

La logique de ce générateur rappelle celle de la figure 3c et celle de l'agrégat central de la figure 5. Si nous supposons que la surface bâtie est concentrée dans les zones desservies et que les zones non desservies correspondent aux zones qui offrent des aménités « rurales », on constate que toutes les zones desservies (et donc bâties) sont limitrophes à des espaces libres (zones vertes et naturelles) qui sont elles-mêmes connexes. Ce modèle combine donc plusieurs avantages :

- la proximité entre les zones vertes et les zones bâties ;
- la concentration du bâti dans des zones bien desservies par le réseau de transport ;
- l'existence de grands espaces non bâtis contigus, ce qui rappelle les objectifs des plans d'urbanisme de Stuttgart et Copenhague ;
- la possibilité de prévoir des centres de service de différents ordres aux nœuds du réseau, en vue de minimiser les distances à parcourir ;
- une conception radioconcentrique de laquelle découle une relative centralité des centres de services.

Dans ce modèle nous avons supposé que l'organisation spatiale du réseau est identique à celle du bâti, mais il est possible de nuancer ce point de vue. Dans l'exemple de la figure 10 nous avons superposé deux logiques fractales :

- un premier générateur sert à modéliser un réseau qui dessert des zones de faible densité, représenté en gris clair ;
- un second générateur dont les éléments sont représentés en gris foncé, ne garde que certains éléments du premier qui sont plus peuplés ou qui offrent plus de services.

La superposition de ces deux fractales, dont la première suit la logique d'un tapis de Sierpinski et la seconde celle d'une poussière de Fournier, donne en seconde itération la figure 10. A la différence du modèle présenté en figure 9, la répartition de la surface bâtie dans les zones desservies par le réseau est inégale. Ce modèle pourrait être encore complexifié en introduisant une logique multifractale⁵.

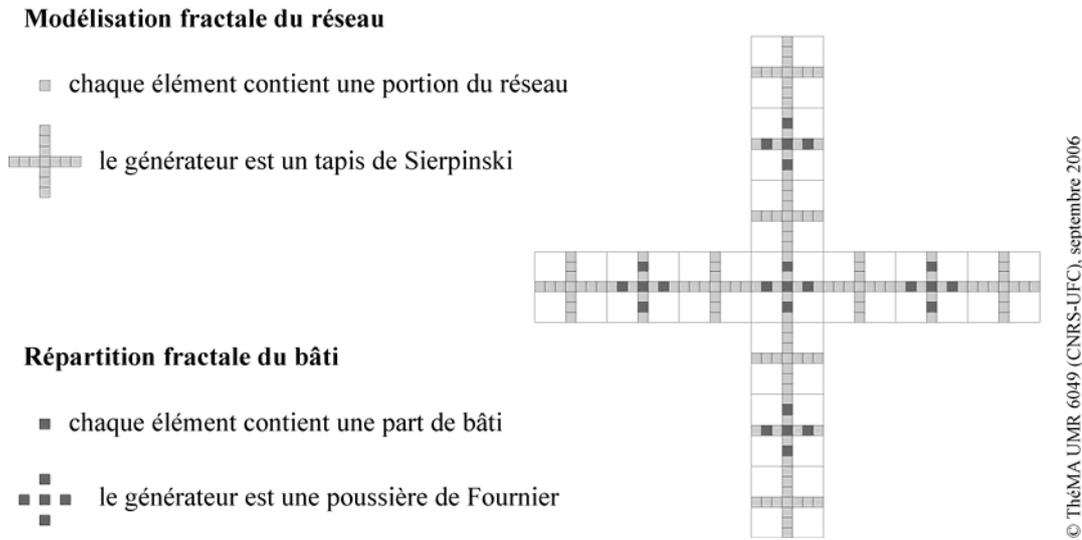


Figure 10. Deux fractales superposées pour modéliser l'articulation entre un réseau de transport et un semis d'habitats

Les deux possibilités, répartition uniforme ou hiérarchique du bâti le long du réseau, sont des alternatives intéressantes :

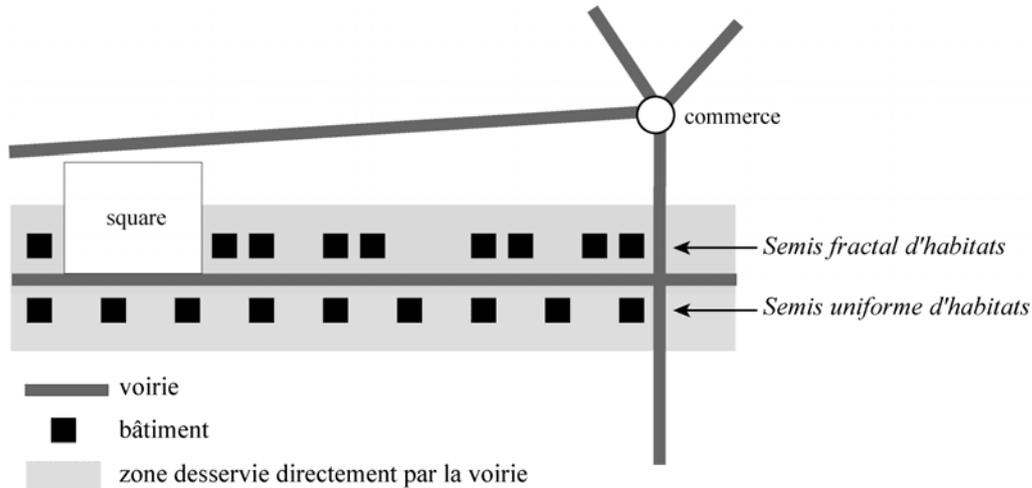
- une répartition uniforme permet de rentabiliser le réseau au maximum, car tous les terrains adjacents sont bâtis ;
- en revanche, une répartition non uniforme permet de créer des aménités collectives (terrains de jeux, squares, places...) et donc de réduire les déplacements pour accéder à ces aménités.

On peut illustrer la différence entre une répartition uniforme ou fractale du bâti au sein d'une zone desservie par un réseau de transport à travers un exemple plus réaliste (cf. figure 11).

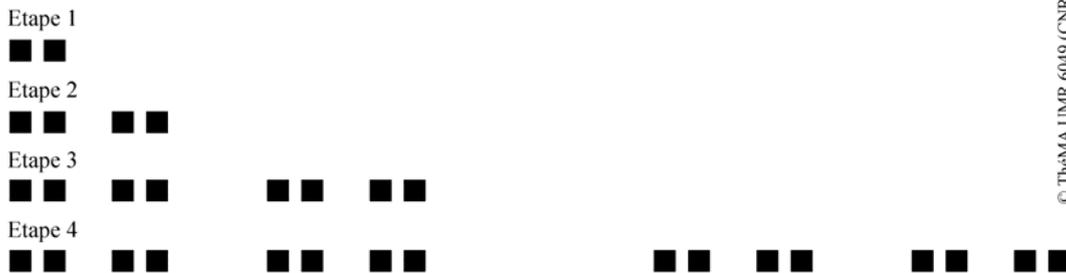
Le réseau présenté sur la figure 10 présente plusieurs particularités : il n'est pas tortueux et les branches ne présentent pas de boucles fermées. Il répond donc à une logique qui minimise en quelque sorte la longueur du réseau par rapport aux lieux à connecter mais le manque de boucles fermées le rend évidemment vulnérable. Toutefois il est possible d'interpréter ce modèle comme la partie qui dessert des zones urbanisées et que d'autres branches existent par ailleurs.

La figure 12 montre d'ailleurs qu'il est possible de construire des réseaux fractals à boucles fermées. Toutefois une telle conception rappelle une ville compacte et fermée. Elle offre des aménités « rurales » uniquement à l'intérieur de la zone desservie sous forme d'espaces vides intramuros non connexes.

⁵ Le modèle présenté n'est pas un modèle multifractal et ne correspond pas exactement au principe de subordination. Il s'agit simplement d'un ensemble fractal (les bâtiments) sur un support qui est lui-même fractal (le réseau). Avec un modèle multifractal, on définirait dans un générateur différents poids (niveaux de gris) pour les éléments. Lors de l'itération ces poids seraient combinés selon une logique multiplicative et feraient ainsi apparaître de nouvelles nuances de gris (cf. par exemple Frankhauser, 1998). Le principe de subordination permet également de combiner deux itérations mais de manière plus complexe (Mandelbrot, 1985).

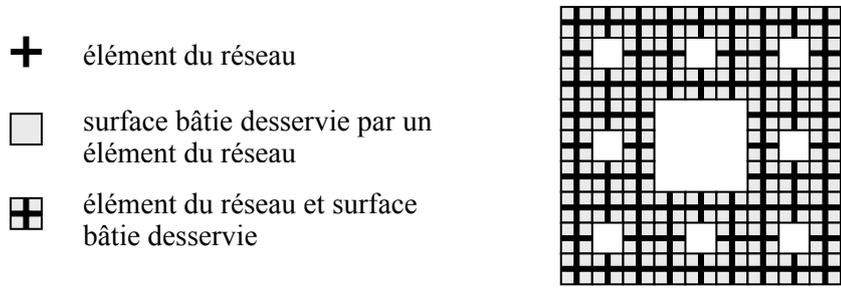


Extension d'un semis linéaire d'habitats suivant la logique d'une poussière de Fournier



© Théma UMR 6049 (CNRS-UFC), septembre 2006

Figure 11. Deux logiques de répartition du bâti sur un réseau



Tiré de (Frankhauser, 1994)

Figure 12. Réseau ramifié combinant des boucles ouvertes et fermées

L'exemple suivant montre que la géométrie fractale permet également de construire des réseaux tortueux (cf. figure 13). Le caractère multi-échelle du réseau apparaît ici dans la taille des différentes boucles : chaque étape d'itération ajoute des boucles de longueur plus importante au réseau initial.

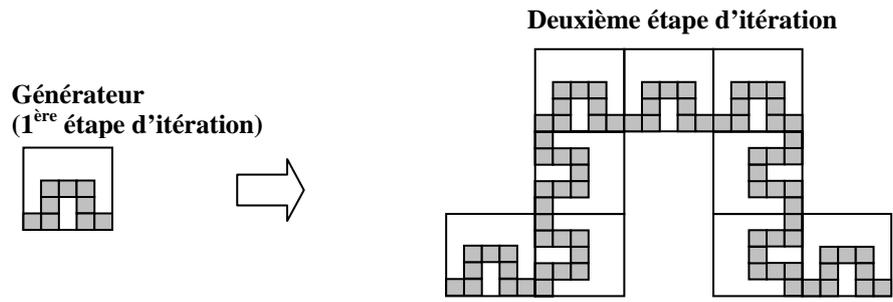


Figure 13. Construction d'un réseau fractal tortueux

Dans le but d'optimiser l'accès à différents types d'aménités, la tortuosité d'un réseau n'est pas la propriété la plus intéressante à développer. Nous avons donc choisi de nous focaliser sur des modèles de réseaux fractals ramifiés hiérarchisés qui permettent :

- de développer des scénarios qui articulent les tissus bâtis et les réseaux ;
- de définir une hiérarchie de centres de service, l'accessibilité de chaque centre de service étant assurée par un système radioconcentrique qui correspond à son aire de chalandise théorique ;
- d'articuler le paysage ouvert, qui offre des aménités récréatives, et les espaces bâtis ; ceci contribue à la qualité de l'environnement résidentiel et réduit les déplacements pour accéder aux espaces libres (verts et naturels) ;
- de préserver des zones non urbanisées de taille importante et d'éviter leur morcellement ;
- de maîtriser l'étalement urbain en concentrant les espaces urbanisés près des axes de transport.

2. Diagnostic des accessibilités et identification des potentiels d'aménagement : description méthodologique

2.1 Objectifs et objets d'étude : quelques précisions

Avant de pouvoir développer des scénarios d'aménagement, il est nécessaire de connaître tant l'organisation spatiale des tissus bâtis existants, que l'accessibilité aux différents types d'aménités offertes aux résidents. L'objectif d'une telle analyse est d'identifier les problèmes actuels, les points qu'il serait utile d'améliorer (résultant d'évolutions antérieures défavorables) et les potentialités de développement.

Comme le but du projet est de développer des scénarios qui permettent une réduction de la longueur totale des déplacements par rapport à la demande sociale tout en respectant la qualité de vie des résidents, nous sommes intéressé par un raisonnement qui prend en compte la fréquence de recours aux aménités et aux services. En effet, le calcul d'un coût de déplacement résulte d'une combinaison entre la distance de l'origine à la destination d'un déplacement et la fréquence de réalisation de ce déplacement.

$$C_i = \sum_j f_j^{(i)} \times d_{ij}$$

C_i : coût total des déplacements pour accéder à diverses aménités à partir d'un lieu de résidence i

$f_j^{(i)}$: fréquence de recours à l'aménité j par un individu localisé en i au cours d'une période de référence

d_{ij} : distance entre le lieu de résidence i et l'aménité j

Nous avons donc choisi de classer les différents types d'aménités « urbaines » (commerces et services) et « rurales » (espaces verts, naturels et de loisir) en tenant compte de leur fréquence de recours. Cependant, nous tenons également compte de la fréquentation contrainte de certains commerces et services. Ainsi, des services tels que le bureau de poste, la pharmacie ou le médecin généraliste sont affectés à une classe qui ne correspond pas nécessairement à la fréquence de recours moyenne effective. Dans ce cas, le service rendu implique que l'accessibilité au service soit de qualité équivalente à celle des commerces et services du niveau auquel ils ont été affectés.

Quatre classe de commerces et services ont été définies. Nous les présentons ici sans commentaire.

- *Niveau 1* (recours quotidien ou pluri-hebdomadaire) : boulangerie, tabac-journaux, écoles, boucherie-charcuterie-traiteur, commerce alimentaire (supermarché et, éventuellement, supérette pour les populations captives et surtout, en milieu urbain).

- *Niveau 2* (recours hebdomadaire) : réparation automobile, café, hypermarché (2 niveaux de fréquence de recours), épicerie-supérette, ou lieu de fréquentation contrainte assez régulière : poste, pharmacie, médecin généraliste.
- *Niveau 3* (recours mensuel) : coiffeur, petites et GMSS, banques-assurances, restaurant, bar "spécialisé" ou "thématique", cinéma, théâtre, patinoire. Sont aussi affectés à ce niveau des lieux de fréquentation contrainte plus épisodique tels que les mairies.
- *Niveau 4* (recours rare) : préfecture, impôts, hôpital, médecins spécialistes, laboratoires d'analyse médicale, hall d'exposition, magasins spécialisés, donc tous les services et administrations de fréquentation rare, à destination d'un grand nombre de personnes.

Tenant compte de l'espace d'étude choisi (zone périurbaine d'une capitale régionale), les niveaux 3 et 4 se confondent en pratique. Ils ne sont donc pas distingués. Par ailleurs, les applications que nous présentons dans la suite de cet article n'ont été réalisées que pour les niveaux 1 et 2. La localisation des services a été effectuée en recourant aux pages jaunes.

Distances associées aux différents niveaux de commerces et services (les distances sont mesurées sur le réseau) :

- *Niveau 1* : nous supposons qu'il s'agit de distances qui sont potentiellement parcourues à pied pour se rendre au commerce ou service considéré à partir du domicile. La portée maximale de l'analyse est fixée à 400 m. (Wiel *et al.*, 1997).
- *Niveau 2* : on identifie, pour chaque service d'un type déterminé, tous les bâtiments qui sont plus proches de ce commerce ou service que les autres établissements du même type ; ceci correspond à la définition d'une aire de chalandise théorique. Ensuite, on détermine la distance maximale qui existe entre l'établissement considéré et les différents bâtiments de son aire de chalandise théorique. Ceci permet de déterminer la portée maximale de l'analyse de desserte d'un commerce ou service via un véhicule motorisé.

Outre les commerces et services, nous avons également considéré l'accès aux espaces verts, naturels et de loisir, que nous avons aussi classés en différentes catégories basée sur la notion de fréquence de recours. Comme dans le cas des commerces et services, les applications que nous présentons dans la suite de cet article n'ont été réalisées que pour les espaces verts et naturels de niveaux 1 et 2.

Espaces verts, naturels et de loisirs de niveau 1 (fréquence de recours potentielle quotidienne ou presque)

→ Espaces de loisirs et de récréation de proximité (dont les espaces verts et naturels visibles depuis le lieu d'habitation)

Nous avons identifié trois types d'accessibilité à des espaces verts, naturels et de loisirs de niveau 1.

- Accessibilité à des espaces à proximité immédiate du logement (de 0 à 30 m. du bâtiment), qui sont des espaces privatifs ou semi-privatifs : jardins des maisons individuelles ; cours ou espaces verts au pied des immeubles. Nous considérons que, dans le périurbain, tout le monde a accès à un espace libre privatif ou semi-privatif.
- Accessibilité à des espaces collectifs (espaces verts et de loisirs) éloignés de 30 à 150 m. du logement : squares, aires de jeux pour enfants, lieux de pratique sportive de petite envergure (terrain de basket, de boules, de football...). Dans le cadre de la recherche présentée, nous n'avons pas recensé les squares, aires de jeux ou terrains de sport dans les différentes communes : nous avons traité globalement les espaces libres situés à proximité du logement.
- Accessibilité directe (visuelle) aux espaces verts et naturels : il s'agit d'un type particulier d'aménités qui ne nécessite pas de déplacement. Travaillant en 2D, définir la vue directe sur les espaces verts et naturels se réduit à l'identification d'un contact direct ($[0 ; 1]$) entre le bâtiment et un espace vert et naturel de taille assez grande.

Espaces verts, naturels et de loisirs de niveau 2 (fréquence de recours potentielle hebdomadaire)

→ Espaces de loisirs et de récréation de type piscine ou forêt périurbaine ou grande aire de jeux pour enfants ou skate-park. Ces espaces doivent être situés à moins de 15 à 20 minutes (en voiture, en transports en commun ou en vélo) du lieu de résidence. Dans le cadre de la présente recherche, nous n'avons pas fait l'inventaire des infrastructures de loisir de niveau 2 ; nous n'avons étudié que les espaces libres, verts et naturels.

Espaces verts, naturels et de loisirs de niveau 3 (fréquence de recours potentielle plus épisodique)

→ Espaces de loisirs et de récréation tels que la forêt de Fontainebleau pour les habitants de la banlieue parisienne ou la campagne franc-comtoise pour les habitants de l'agglomération bisontine (vallée de la Loue, station de ski de Métabief...).

2.2 Méthodes d'analyse

Afin de pouvoir évaluer la situation de chacun des deux secteurs considérés (secteur du plateau et secteur Nord) et d'identifier leurs potentialités de développement, différents aspects des configurations spatiales existantes sont étudiés, à chaque fois selon une approche fractale :

- la répartition de la surface bâtie (caractérisation de la fractalité du tissu bâti : degré de hiérarchie, de fragmentation...);
- la localisation des services de différents niveaux et leur accessibilité à partir des zones habitées ;
- la forme de la bordure urbaine afin d'étudier l'articulation entre paysage ouvert et espace bâti ;
- la répartition des zones récréatives (espaces verts, naturels et de loisir) et leur accessibilité à partir des zones habitées.

Différentes méthodes d'analyse, déjà existantes ou développées dans le cadre de la présente recherche, ont été utilisées.

Analyse fractale de la répartition de la surface bâtie

Les analyses réalisées depuis plusieurs d'années, notamment dans le cadre d'un projet de recherche intitulé « Morphologie des « villes émergentes » en Europe à travers les analyses fractales » du PUCA (Frankhauser, 2003), et d'autres travaux récents (De Keersmaecker, 2003 et 2004), ont montré que deux méthodes d'analyse donnent des informations particulièrement pertinentes sur le bâti :

- l'analyse de corrélation renseigne dans quelle mesure la surface bâtie est répartie de façon plus ou moins uniforme ;
- l'analyse radiale donne une information détaillée sur la baisse de l'intensité d'occupation du sol à partir d'un lieu choisi.

La présentation de ces méthodes a déjà fait l'objet de plusieurs publications auxquelles nous nous référons (Frankhauser, 1994 ; 1998 ; 2005). Précisons simplement ici que ces analyses ne se limitent pas à la seule mesure d'indicateurs, tels que des dimensions fractales, mais sont utilisées pour localiser des zones de développement potentiel en considérant l'allure des courbes d'analyse.

Mesure de l'accessibilité aux commerces et services

Sur chacun des deux secteurs étudiés, différents types de commerces et services ont été localisés. Pour chacun d'eux, il est possible de mesurer son accessibilité à partir des habitations résidentielles. Pour ce faire, trois méthodes ont été utilisées, s'appuyant toutes trois sur la logique de l'analyse radiale selon laquelle les propriétés du réseau sont étudiées à partir d'un point donné (*i.e.* la localisation d'un commerce ou service). Les deux premières méthodes mettent en évidence l'accessibilité potentiellement fournie par le réseau, sans considérer la présence réelle d'habitations :

- *l'analyse radiale du réseau* permet de mettre en évidence, à travers l'étude de l'aspect de la courbe d'analyse, dans quelle mesure la localisation d'un service est optimale par rapport à une

logique radioconcentrique ; les distances sont mesurées à vol d'oiseau (rayon de l'analyse radiale) ;

- *l'analyse d'accessibilité* suit une logique semblable à l'analyse radiale du réseau mais les distances sont cette fois mesurées sur le réseau ; elle met aussi en évidence le fait que le réseau suit ou non une logique radioconcentrique.

Une troisième méthode tient compte de l'existence ou non de bâtiments sur le réseau. Il s'agit de *l'analyse de desserte*, qui permet de déterminer si le bâti est réparti de manière uniforme le long du réseau de transport ou s'il forme lui-même une fractale.

La comparaison des résultats fournis par ces différentes analyses présente un intérêt pour identifier des développements potentiels en matière d'urbanisation.

○ L'analyse radiale du réseau

Elle a déjà été présentée et utilisée par différents auteurs, aux publications desquels nous vous invitons à vous référer (Thibault et Marchand, 1987) (Frankhauser, 1994) (Benguigui et Daoud, 1991) (Genre-Grandpierre, 1999 et 2000).

○ L'analyse d'accessibilité

Elle est en général désignée dans la littérature par l'expression d'*analyse d'étalement* (Gouyet, 1992). Elle a été utilisée par C. Genre-Grandpierre (1999 et 2000) pour caractériser les réseaux de transport. Elle permet de calculer une dimension d'accessibilité locale. L'analyse d'accessibilité part du principe qu'un réseau peut être à la fois ramifié et tortueux. Elle consiste à compter le nombre d'éléments du réseau⁶ à une certaine distance d'un point de comptage donné à savoir, dans notre cas, un commerce ou un service (boulangerie, pharmacie, superette...). Dans le cas d'une structure fractale, une loi de puissance caractérise le nombre total de lieux situés à une distance inférieure ou égale à une valeur λ mesurée sur le réseau :

$$N(\lambda) \propto \lambda^{D_{acc}} \quad (1)$$

Figure 14a

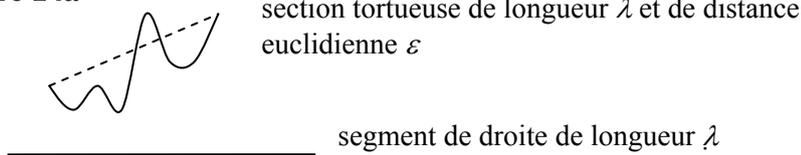


Figure 14b

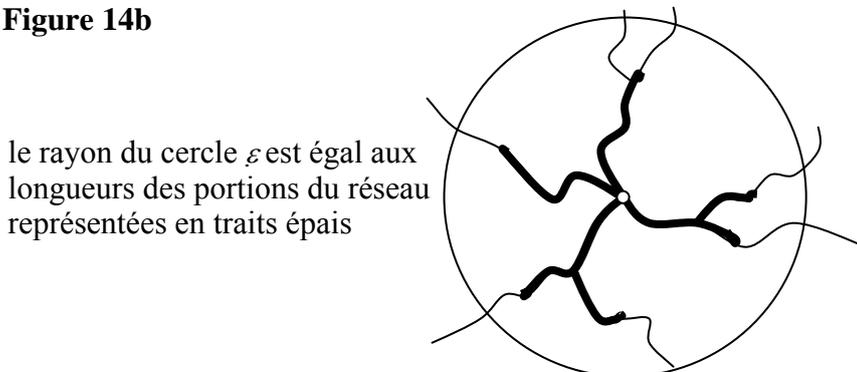


Figure 14. Illustrations de la différence entre une distance euclidienne et la même distance mesurée sur le réseau

⁶ Dans le sens d'une analyse fractale du réseau, les éléments constitutifs de celui-ci sont les points appartenant aux lignes qui définissent le réseau. Ces éléments sont représentés sous la forme de carrés grisés sur les figures 10 et 13.

Rappelons que l'analyse radiale fournit une relation équivalente, mais se réfère à la distance euclidienne ε (cf. figure 14b) :

$$N(\varepsilon) \propto \varepsilon^{D_{rad}} \quad (2)$$

La dimension D_{acc} est liée à la tortuosité de la structure (Gouyet, 1992) : plus les branches du réseau sont tortueuses, plus la distance est grande sur le réseau pour atteindre un point situé à une certaine distance euclidienne ε du centre de comptage (figure 14a).

L'analyse radiale se réfère, elle, à la distance euclidienne au centre. Elle cumule donc plus de longueur de réseau pour la même distance λ donnée que l'analyse d'accessibilité (figure 14b). Ceci explique qu'il existe une relation générale (Gouyet, 1992) :

$$D_{acc} \leq D_{rad}$$

L'égalité entre les deux termes de cette relation est atteinte uniquement dans le cas de réseaux ramifiés mais non tortueux, tels que celui présenté en figure 10.

Si on mesure séparément les longueurs euclidiennes ε qui correspondent aux longueurs λ mesurées sur les différentes branches du réseau, on devrait trouver qu'en moyenne cette longueur est reliée à ε par une loi fractale du type :

$$\lambda(\varepsilon) \propto \varepsilon^{D_{min}} \quad (3)$$

En insérant (3) en (2) et en comparant cette nouvelle relation à (1), on obtient :

$$D_{acc} = \frac{D_{rad}}{D_{min}} \quad (4)$$

... qui établit un lien entre les trois dimensions.

Ainsi, l'analyse radiale d'un réseau caractérise à la fois sa tortuosité et sa ramification ; l'analyse d'accessibilité caractérise sa ramification : la comparaison entre l'analyse radiale et l'analyse d'accessibilité met donc en évidence la tortuosité du réseau.

o L'analyse de desserte⁷

Nous considérons maintenant la surface bâtie par rapport au réseau. Comme nous l'avons expliqué en section 1, les bâtiments peuvent être répartis de manière uniforme ou non le long d'un réseau. Si la répartition des bâtiments suit plutôt la logique d'une poussière de Fournier, elle peut être considérée comme un sous-ensemble fractal sur un support fractal qui est le réseau (cf. figure 10).

Pour le bâti, comme précédemment pour le réseau, on suppose l'existence d'une relation fractale :

$$N_b(\varepsilon) \propto \varepsilon^{D_{rad/b}} \quad (5)$$

... dans laquelle $D_{rad/b}$ est la dimension radiale du bâti. Rappelons ici que nous travaillons à partir d'un point de comptage fixe qui correspond à la localisation d'un commerce ou service.

Comme notre objectif est de considérer la desserte des bâtiments par le réseau nous remplaçons la distance euclidienne ε par la distance sur le réseau λ en nous basant sur les relations (3):

$$N_b(\lambda) \propto \lambda^{\frac{D_{rad/b}}{D_{min}}}$$

⁷ Cette analyse a été imaginée spécialement pour répondre aux besoins de la recherche ici présentée, ce qui explique qu'aucune référence bibliographique ne l'accompagne.

Nous appelons ce nouvel exposant « dimension de desserte » : $D_{des} = \frac{D_{rad/b}}{D_{min}}$

*Mesure de l'accessibilité aux zones vertes, naturelles et de loisir*⁸

Les mesures d'accessibilité aux espaces verts et naturels sont basées sur l'identification des enveloppes d'ensembles morphologiques cohérents (cf. (Frankhauser, Tannier, 2005) et (Tannier, Frankhauser, 2006)). L'identification d'enveloppes morphologiques permet d'extraire, à partir d'une image du tissu bâti, une représentation graphique des espaces libres propres à un niveau d'échelle donné. Ces espaces libres sont supposés être des espaces verts et naturels.

La procédure d'identification des enveloppes morphologiques est la suivante. À l'aide d'un logiciel de traitement d'images ou du logiciel *Fractalysé*⁹ on applique une dilatation pas à pas au tissu bâti. La dilatation consiste à entourer chaque élément noir de l'image d'une bordure noire. À chaque étape de dilatation, l'épaisseur de cette bordure noire augmente ; les agrégats fusionnent de proche en proche et, par conséquent, leur nombre diminue.

Comptage du nombre d'agrégats bâtis à chaque étape de dilatation

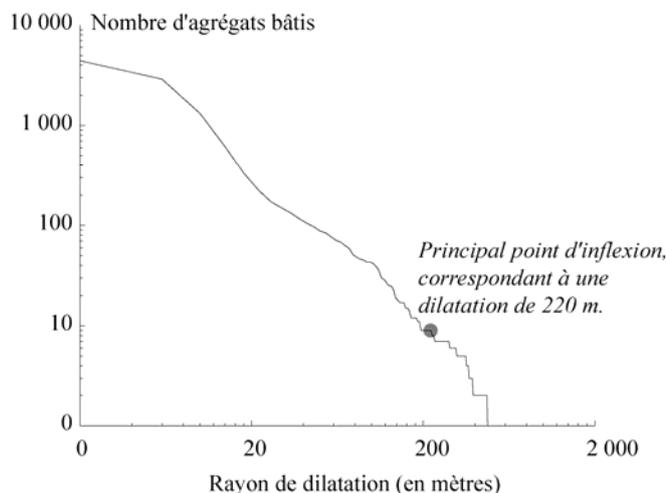


Figure 15. *Secteur Nord
Agglomération de Besançon*

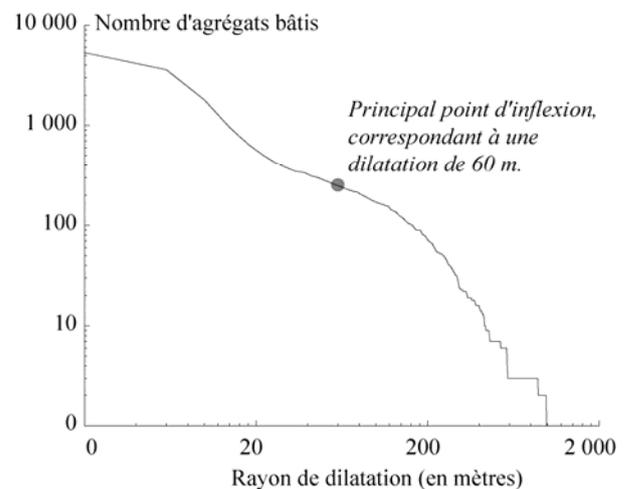


Figure 16. *Secteur du Plateau de Saône
Agglomération de Besançon*

Les graphiques présentés en figure 15 et 16 affichent les résultats de la dilatation du tissu urbain pour les deux secteurs d'application. L'axe des abscisses représente la taille de l'élément dilaté à chaque étape de dilatation. Celui des ordonnées correspond au nombre d'agrégats également à chaque étape de dilatation. En identifiant le principal point d'inflexion de la courbe correspondant à un changement majeur de comportement de celle-ci, on détermine l'étape de dilatation qui, pour le tissu bâti étudié, permet de délimiter des ensembles morphologiques cohérents (cf. figures 17 et 18). Avant ce point d'inflexion, la vitesse de décroissance du nombre d'agrégats diminue au fil des dilatations ; après, la vitesse augmente.

Concernant les mesures d'accessibilité proprement dite, on distingue deux situations : quand l'accès à l'espace vert se fait par le réseau et quand il s'agit d'un accès visuel direct.

⁸ Remarque : les espaces verts, naturels et de loisirs sont géométriquement des surfaces, et non des points comme c'est le cas des commerces et services.

⁹ <http://www.fractalysé.org>

○ Accessibilité directe

La forme de la bordure urbaine détermine le niveau d'accessibilité "directe" (*i.e.* le plus ou moins grand nombre de contacts directs) entre le bâti résidentiel et les espaces verts ou naturels. En effet, une bordure urbaine présentant un fort emboîtement d'échelles permet une maximisation du nombre de contacts directs entre bâti résidentiel et espaces libres, verts ou naturels, tout en minimisant les distances entre bâtiments résidentiels et différents types d'espaces libres, verts ou naturels.

La mesure de l'accessibilité directe aux espaces verts et naturels consiste à compter, pour chaque commune, le nombre de bâtiments situés au contact immédiat avec l'enveloppe morphologique identifiée à l'échelle du secteur¹⁰. Le choix de travailler à partir d'une enveloppe morphologique définie à l'échelle du secteur permet d'une part, de s'intéresser essentiellement aux espaces libres de grande taille, et d'autre part, d'intégrer indirectement la notion de profondeur de vue.

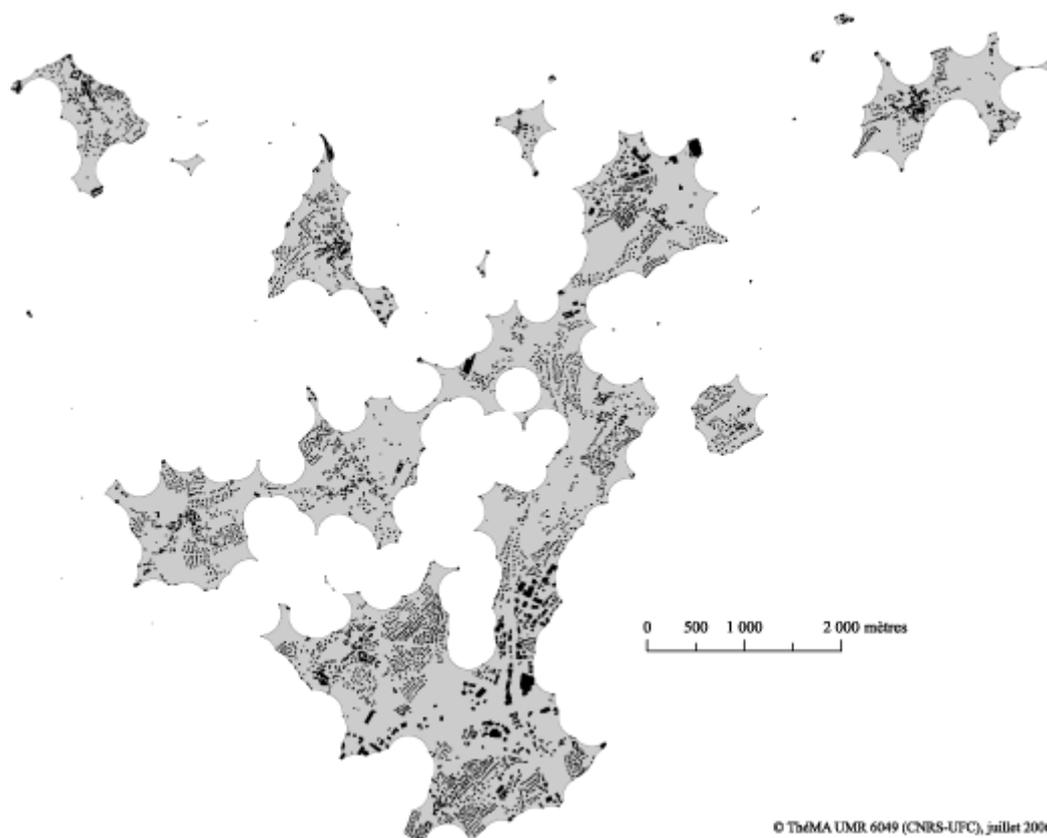


Figure 17. *Enveloppe morphologique du secteur Nord – Agglomération de Besançon*

○ Accessibilité par le réseau

Niveau 1 : Accessibilité à des espaces collectifs (espaces verts et de loisirs) éloignés de 30 à 150 m. du logement. Comme nous traitons de manière globale l'ensemble des espaces libres situés à proximité du logement, nous avons pris le parti d'identifier l'enveloppe morphologique à l'échelle de la commune, puis de compter le nombre de bâtiments situés à moins de 150 m. de cette enveloppe. Les distances sont calculées sur un réseau qui intègre, outre la voirie habituellement considérée, les chemins praticables.

Accessibilité à des espaces verts et naturels de niveau 2. Le calcul de cette accessibilité est basé sur l'identification de l'enveloppe morphologique de chaque secteur, puis la mesure de la distance moyenne par commune entre chaque bâtiment et cette enveloppe. Les distances sont calculées sur le réseau habituel de voirie.

¹⁰ Nombre de bâtiments résidentiels situés à moins de 5 mètres à vol d'oiseau de l'enveloppe du secteur.

Accessibilité à des espaces verts et naturels de niveau 3. Le calcul de cette accessibilité consiste en la mesure de la distance moyenne entre chaque bâtiment et l'enveloppe morphologique de l'agglomération. Si un bâtiment est situé à l'extérieur de cette enveloppe morphologique, sa distance est de fait égale à 0. Cette accessibilité a été mentionnée pour information sachant que, dans le cadre de la présente recherche, nous ne travaillons que sur les aménités de niveau 1 et 2.



Figure 18. *Enveloppe morphologique du secteur du Plateau – Agglomération de Besançon*

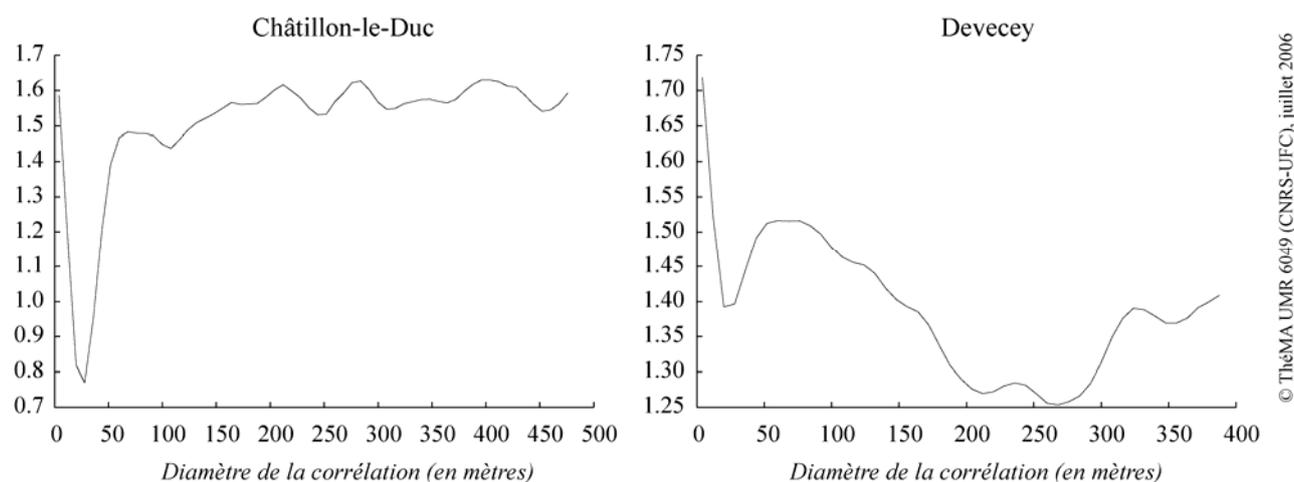
2.3 Résultats des analyses

Nous nous contenterons ici d'une présentation partielle des résultats d'analyse obtenus à l'échelle des secteurs et pour quatre communes (Châtillon-le-Duc et Devecey pour le secteur Nord ; Sône et

Nancray pour le secteur du Plateau). L'objectif est d'illustrer l'application du protocole méthodologique décrit ci avant à travers quelques exemples.

Evaluation du caractère multi-échelle du tissu bâti

Dans le cadre de l'analyse de corrélation appliquée au tissu bâti, les déviations dans la courbe du comportement scalant fournissent des indices qui peuvent servir à mettre en évidence des potentiels de développement. Elles donnent des indications sur les zones à urbaniser en priorité considérant uniquement un objectif de régularisation fractale d'un tissu bâti.



© Théma UMR 6049 (CNRS-UFC), juillet 2006

Figure 19. Analyse des tissus bâtis de deux communes du secteur Nord : courbes du comportement scalant issues de l'analyse de corrélation

Comparons par exemple les tissus bâtis de deux communes du secteur Nord : Devecey et Châtillon-le-Duc¹¹. Le système spatial de Châtillon-le-Duc fait preuve, sous l'angle de l'analyse de corrélation, d'une grande régularité. Au contraire, Devecey présente une rupture dans l'organisation spatiale hiérarchique du tissu bâti pour des distances comprises entre 150 et 330 m. Une volonté d'aménagement pourrait être d'éliminer cette rupture selon l'idée d'une rectification fractale du tissu bâti.

Accessibilité aux espaces verts et naturels

A l'échelle des secteurs, les enveloppes d'ensembles morphologiques cohérents sont identifiées pour un rayon de dilatation égal à 220 mètres pour le secteur Nord, et un rayon de dilatation égal à 60 mètres pour le secteur du Plateau. Cette différence importante est intéressante à noter : elle laisse penser que la proximité aux espaces verts et naturels de niveau 2 est en général plus grande sur le secteur du Plateau que sur le secteur Nord. La mesure de l'accessibilité du bâti résidentiel aux espaces verts et naturels de niveau 2 confirme ceci : sur le Plateau, les bâtiments résidentiels sont éloignés de 162 m. environ d'un espace vert et naturel de niveau 2, tandis que ce chiffre atteint 405 m. pour le secteur Nord¹². Les valeurs d'accessibilité directe (niveau 1) montrent les mêmes tendances : en moyenne 44 % des bâtiments résidentiels du Plateau bénéficient d'une proximité immédiate à la bordure urbanisée tandis que cette valeur n'atteint que 11 % dans le secteur Nord¹³. Toutefois, une analyse de l'accessibilité sur le réseau aux espaces verts et naturels de niveau 1 force à nuancer cette affirmation. En effet, l'identification de l'enveloppe bâtie à l'échelle des communes montre qu'environ 60% des bâtiments résidentiels des communes de Saône et Nancray sont situés à moins de 150 m. d'un espace vert et naturel de niveau 1. En revanche, Châtillon-le-Duc compte

¹¹ Pour cette commune, la zone industrielle située au Sud a été exclue de l'analyse.

¹² Cette valeur est égale à 471 m. pour Châtillon-le-Duc, 510 m. pour Devecey, 170 m. pour Nancray et 207 m. pour Saône.

¹³ Cette valeur est égale à 7 % pour Châtillon-le-Duc, 9 % pour Devecey, 39 % pour Nancray et 30 % pour Saône.

plus de 80% de bâtiments résidentiels dans cette situation et Devecey en compte plus de 70%.

La présentation rapide de ces quelques résultats illustre bien l'intérêt de telles analyses dans l'optique d'un diagnostic territorial et d'une recherche de solutions d'aménagement. Elle suggère aussi immédiatement une réflexion sur la définition du meilleur compromis possible (ou de la configuration optimale), qui permettrait d'allier une bonne accessibilité (directe et par le réseau) aux espaces verts et naturels de niveau 1 et 2.

Accessibilité aux commerces et services

Nous présentons ici deux exemples afin de donner un avant-goût des informations qu'il est possible d'obtenir à partir des analyses que nous avons décrites en 2.1.

Pour toutes les analyses, nous nous sommes appuyés sur les relations fractales suivantes :

$$N(\varepsilon) = a_{rad} \times \varepsilon^{D_{rad}} + c_{rad}$$

$$N(\lambda) = a_{acc} \times \varepsilon^{D_{acc}} + c_{acc}$$

$$N(\lambda) = a_{des} \times \varepsilon^{D_{des}} + c_{des}$$

Les paramètres a et c permettent un ajustement correct entre une distribution observée et une distribution fractale théorique, même en cas de déviations locales à la loi fractale (Frankhauser, 1998 ; 2003). Les paramètres ont été estimés avec le logiciel *Fractalysse*. Nous avons identifié les distances pour lesquelles on constate une forte rupture dans l'allure de la courbe (*cf.* figure 22). Les paramètres ont été estimés pour une fourchette de distances inférieures à ces distances critiques. En général, nous avons contrôlé les résultats en recourant également à la relation dans laquelle le paramètre a est contraint à un . Dans les cas où $a < 0,2$ ou $a > 3$ on remarque une différence significative entre les résultats obtenus par les deux lois d'estimation (avec ou sans contrainte sur la valeur de a). Dans ce cas, nous avons indiqué la seconde valeur de D entre parenthèses. Il s'agit alors de configurations spatiales pour lesquelles la loi fractale est moins valable.

Le premier exemple est celui d'une boulangerie située dans le bourg de Saône (*cf.* figure 20).

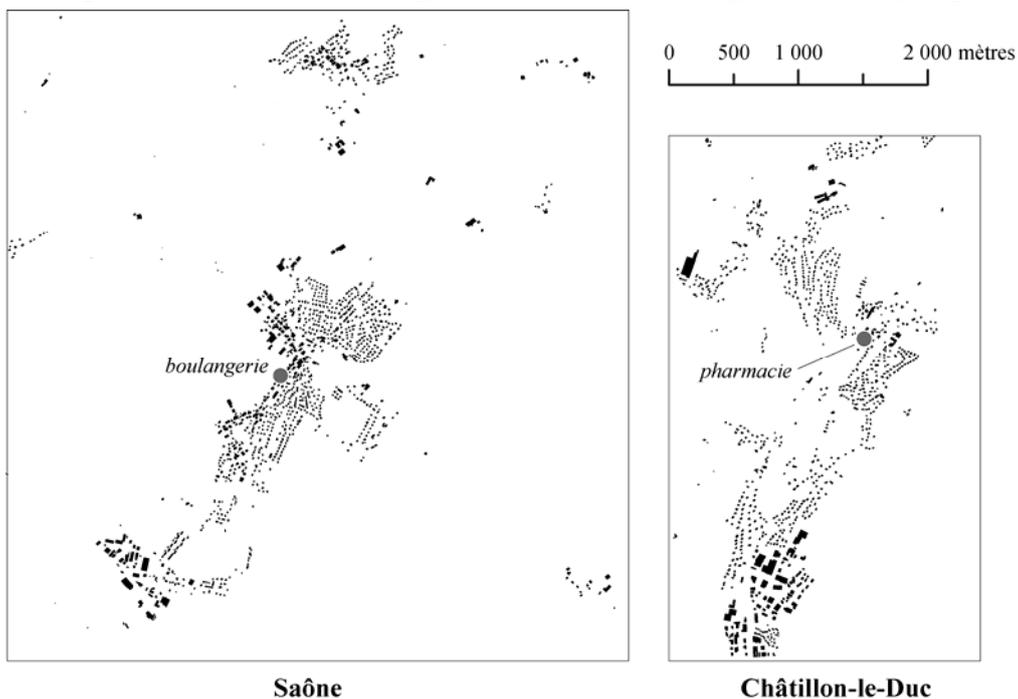


Figure 20. Localisation des deux établissements étudiés

Les valeurs des dimensions fractales obtenues à partir de cette boulangerie sont les suivantes.

	1 ^{ère} distance segmentation (en m)	Dimension fractale
Analyse radiale du bâti	700	1,42
Analyse radiale du réseau	732	1,60
Analyse d'accessibilité	1128	1,97 (1,42)
Analyse de desserte	1100	1,78

Les seuils de distance identifiés sont en cohérence avec l'organisation spatiale générale du tissu bâti et le réseau : elles correspondent en grande ligne aux limites de la zone urbanisée, à l'exception de la zone d'activité situé au Sud de la commune, qui paraît donc assez isolée (cf. figure 21). La comparaison entre l'analyse radiale du réseau (cf. figure 21a) et l'analyse d'accessibilité (cf. figure 21b) montre que les seuils identifiés sont à peu près identiques ; la tortuosité du réseau n'affecte donc pas particulièrement sa fonctionnalité.

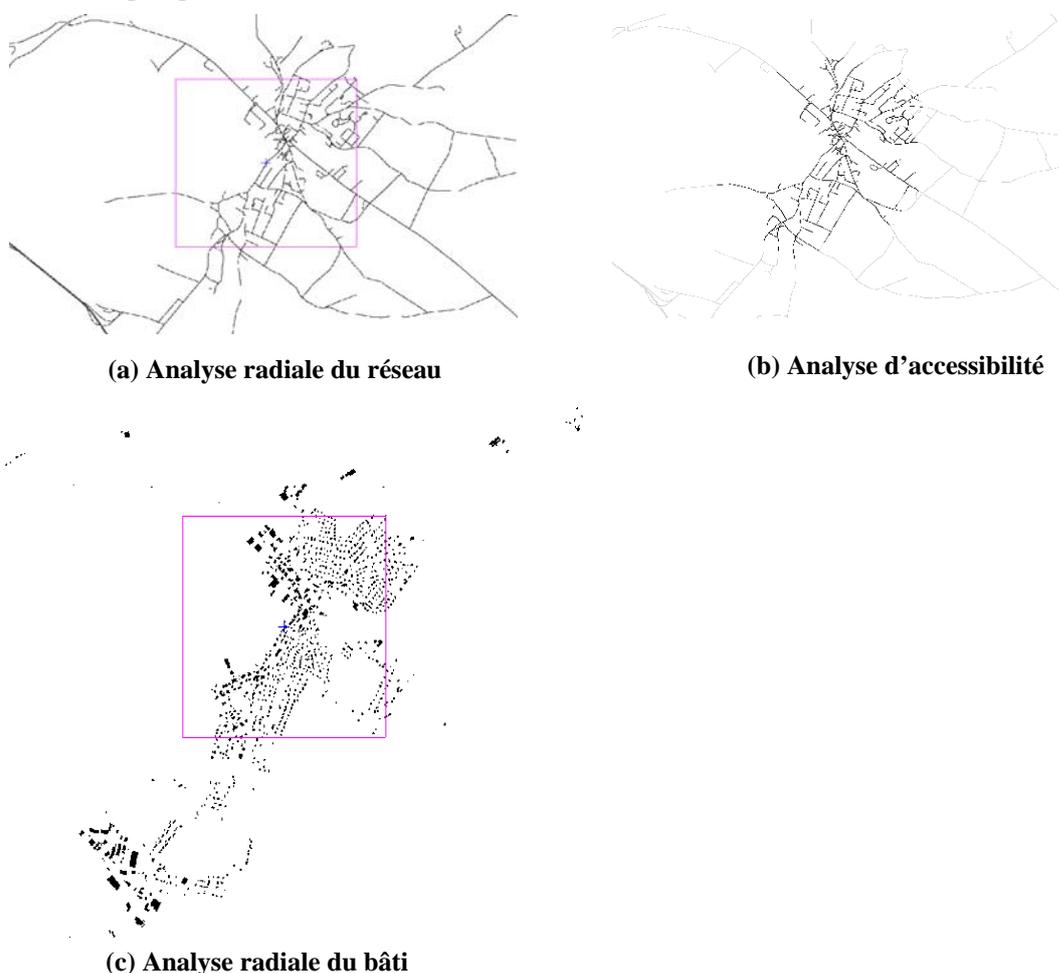


Figure 21. Seuils de distance identifiés par différentes analyses à partir de la boulangerie de Saône

Les valeurs assez basses des dimensions radiales montrent que la densité bâtie et la densité du réseau diminuent assez rapidement autour de la boulangerie, ce qui pourrait laisser supposer une mauvaise localisation du service par rapport au bâti existant. Toutefois, la dimension radiale du bâti à partir de la boulangerie est proche de celle obtenue en se positionnant au centre du village. Ceci incite à penser qu'il existe un potentiel de développement à proximité du centre du village. Une information plus détaillée peut être obtenue en se référant à l'allure des courbes empiriques. La figure 22 montre les courbes du comportement scalant des analyses radiales sur lesquelles les seuils de distances ont été indiqués. On s'aperçoit qu'en faisant abstraction des fluctuations locales de l'exposant scalant, qui existent toujours dans ce type d'analyse (Frankhauser 1998 et 2003),

l'exposant scalant moyen varie peu. Les valeurs plus basses pour les très petites distances montrent que la boulangerie ne se trouve pas au centre du village. Le réseau suit à peu près la même logique, même s'il existe une certaine disparité des valeurs, dans le village et la périphérie, pour des distances intermédiaires (inférieures aux seuils de distance identifiés).

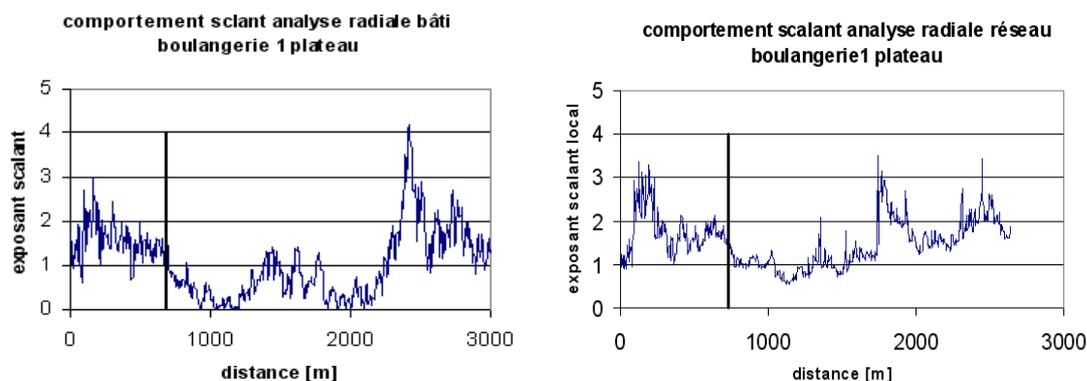


Figure 22. Courbes du comportant scalant issues des analyses radiales du bâti et du réseau

En vue d'évaluer la position du service par rapport à la répartition du bâti, la comparaison entre l'analyse d'accessibilité et l'analyse de desserte paraît particulièrement intéressante. Dans cette optique, nous avons représenté les deux courbes empiriques sur un même graphique (*cf.* figure 23). Afin de pouvoir réellement évaluer la situation actuelle, nous avons déterminé la distance moyenne entre maisons voisines, qui est à Saône d'environ 20 m. En supposant qu'il se trouve de chaque côté de la rue une maison, nous posons que le réseau rend accessible tous les 10 m un terrain potentiellement constructible : ceci correspond à l'hypothèse d'une répartition uniforme du bâti le long du réseau. L'intervalle de distances considéré correspond à l'aire de chalandise théorique de la boulangerie. On remarque que celle-ci est assez étendue car elle atteint les villages voisins. Les deux courbes (accessibilité et desserte) sont à peu près en cohérence jusqu'à ce qu'on atteigne le seuil de distance précédemment identifié. La répartition du bâti semble donc assez uniforme sur le réseau.

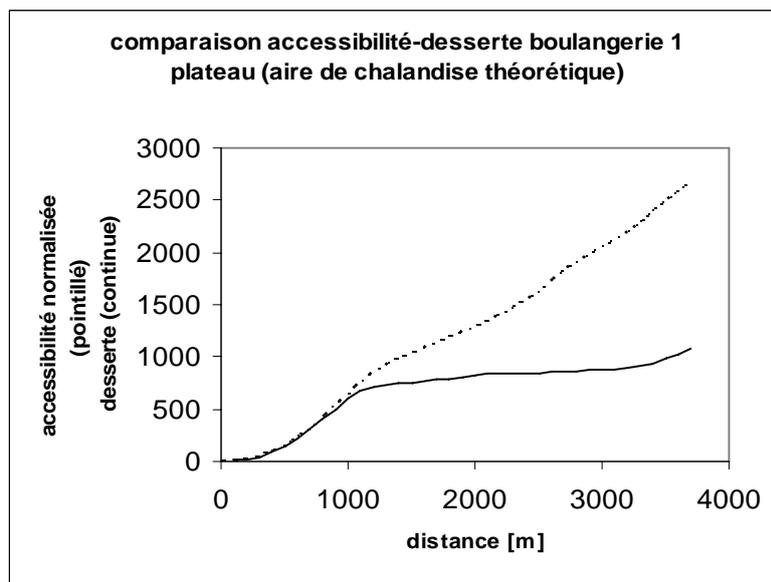
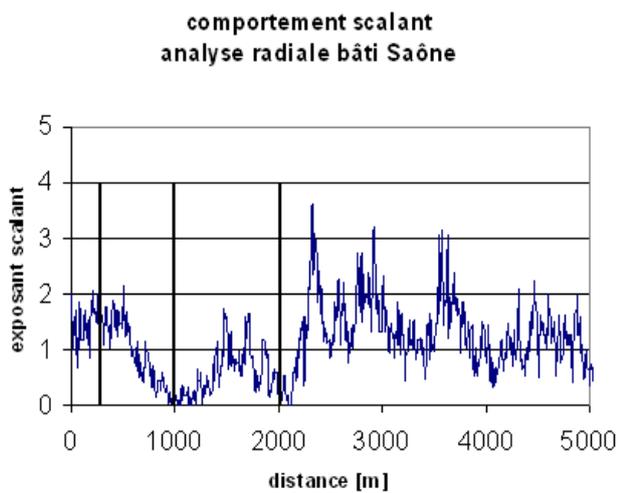


Figure 23. Comparaison entre les valeurs fractales de desserte (après normalisation) et d'accessibilité de la boulangerie de Saône

L'exemple montre que la boulangerie n'est pas trop mal positionnée au regard de son environnement immédiat, c'est-à-dire par rapport au village dans lequel elle est implantée. En revanche, comme le semis d'habitats est organisé selon une logique multi-échelle, discontinue sur le plateau, l'aire de chalandise théorique est pratiquement vide au-delà de la limite du village (*i.e.* elle

ne recouvre quasiment aucun bâtiment résidentiel).

En ce qui concerne les potentialités de développement du village de Sâone lui-même, comme les dimensions fractales sont assez basses, une « densification fractale » serait possible en développant par exemple un axe routier supplémentaire, sans pour autant changer le principe de l'organisation spatiale du village. Une autre possibilité serait d'allonger les axes urbanisés existants. En effet, la zone périphérique au Sud est isolée du village ce qui apparaît sur la courbe du comportement scalant (cf. figure 24). On pourrait donc promouvoir un développement axial de l'urbanisation. Il ne s'agit ici que de quelques pistes possibles.



Note : sur la carte, le premier seuil de distance (< 1000) n'est pas représenté.

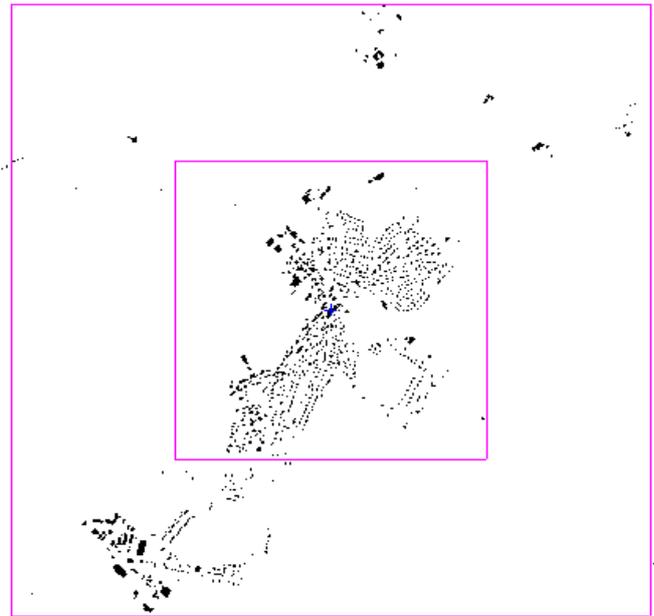


Figure 24. Analyse radiale du bâti de Saône effectuée à partir du centre du village : courbes du comportement scalant et segmentation radiale du bâti associée

Le second exemple que nous présentons est celui d'une pharmacie située dans le secteur Nord, à Châtillon-le-Duc (cf. figure 20). La méthodologie d'analyse est la même que précédemment. Nous nous bornons donc à présenter quelques résultats et nous focalisons plus particulièrement sur le commentaire des courbes obtenues.

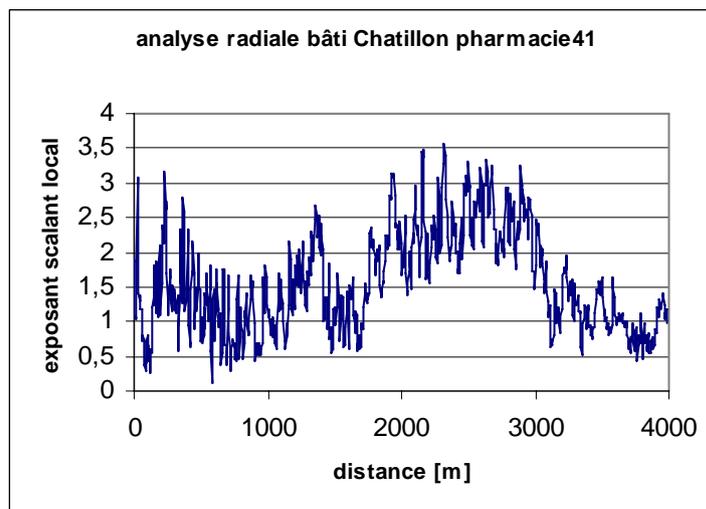


Figure 25. Analyse radiale du bâti effectuée à partir de la pharmacie de Châtillon-le-Duc

L'analyse radiale du bâti à partir de la pharmacie montre que l'espace étudié ne présente pas de rupture nette : le bâti est distribué de manière assez continue dans cette zone (cf. figure 25). Toutefois, les fluctuations locales sont considérablement plus fortes que dans le cas de Saône, ce qui caractérise une organisation spatiale plus irrégulière et ceci, sur l'ensemble de la fourchette de distances. L'analyse d'accessibilité montre les mêmes caractéristiques, mais les fluctuations sont un peu moins importantes (cf. figure 26). La première rupture identifiée, pas très nette, reste assez locale et s'explique par l'organisation spatiale floue et plutôt morcelée de la zone en question.

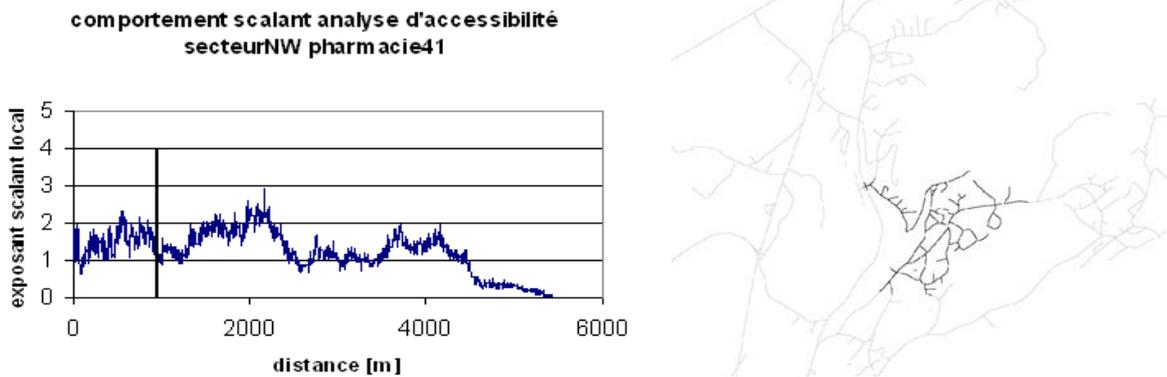


Figure 26. Analyse d'accessibilité à partir de la pharmacie de Châtillon-le-Duc : comportement scalant et segmentation du réseau résultante

Comparons de nouveau l'accessibilité et la desserte à travers la même logique utilisée précédemment (cf. figure 27). La distance moyenne entre les maisons est d'environ 40 m. Toutefois, pour modéliser une répartition continue du bâti le long du réseau, nous avons repris la taille moyenne des lots de Saône, qui est de 20 m. Ainsi, le nombre de parcelles réellement desservies par le réseau reste en dessous de l'accessibilité potentielle de celui-ci. En tous cas, la courbe de l'analyse de desserte est beaucoup moins régulière qu'à Saône.

Les potentialités de développement méritent d'être étudiés de manière plus subtile qu'à Saône. En effet, on constate que la morphologie du réseau n'est pas toujours en cohérence avec celle du bâti ; il pourrait donc être utile d'améliorer cette cohérence. Cependant, il est évident que la seule considération d'un service (de niveau 2) ne suffit pas pour évaluer la qualité d'accessibilité à l'ensemble des aménités « urbaines », qui est par ailleurs assez mauvaise en ce qui concerne le niveau 1. En outre, la prise en compte de l'organisation spatiale des espaces verts et naturels, qui sont plus résiduels et donc fragiles que sur le secteur du Plateau, doit aussi être considérée.

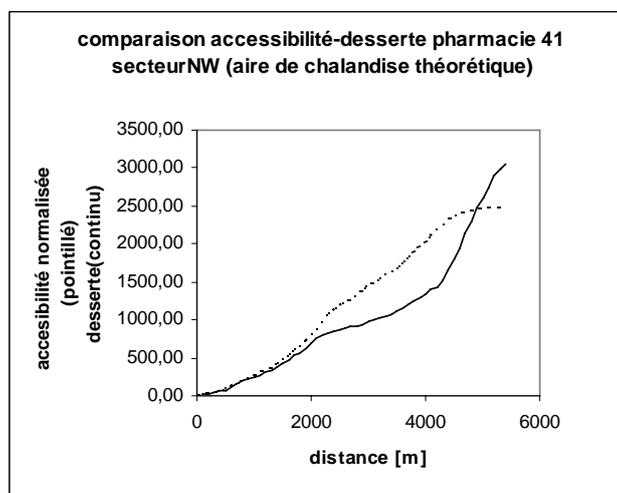


Figure 27. Comparaison entre les valeurs fractales de desserte (après normalisation) et d'accessibilité de la pharmacie de Châtillon-le-Duc

3. Conclusion : vers la proposition de scénarios d'aménagement

Nous avons présenté une nouvelle approche conceptuelle, accompagnée d'un protocole méthodologique, pour orienter l'aménagement du territoire à l'échelle d'une agglomération, dans le but de limiter l'étalement urbain sans pour autant le rejeter *a priori*. Un des aspects importants de cette approche est d'accepter comme un fait établi certaines causes de l'étalement urbain, qui correspondent à une diversification des modes de vie. Ainsi, nous prenons en compte une demande sociale qui souhaite pouvoir bénéficier à la fois de services « urbains » mais aussi d'aménités « rurales » à une distance acceptable de leur résidence. En même temps, l'objectif est de préserver des espaces non urbanisés, afin de réduire à néant les menaces de mitage urbain ou de morcellement et de réduire les distances à parcourir pour accéder aux divers types d'aménités.

Nous avons montré que le principe d'emboîtement d'échelles, tel qu'il apparaît dans la géométrie fractale, permet de développer des modèles qui peuvent répondre à ces objectifs. Comme le but est de proposer des scénarios potentiels pour un développement futur (extension du tissu bâti), une méthodologie a été développée qui permet d'évaluer la répartition actuelle des zones résidentielles au regard de l'accessibilité à des commerces et services de différents niveaux et aux espaces verts et naturels. A partir de quelques exemples, nous avons montré de quelle manière ces analyses peuvent conduire à identifier globalement des potentiels de développement.

Il est prévu de compléter cette démarche en utilisant une méthode en cours d'élaboration, la *décomposition fractale* qui a pour but d'identifier plus concrètement, à partir d'une analyse de la configuration spatiale du tissu bâti existant, le nombre et la localisation de zones propices à une urbanisation future. Utilisant un système de fonctions itératives, un logiciel de simulation également en cours de développement permettra la *génération de scénarios d'aménagement fractals*, qui respectent certains critères définis suite à la décomposition fractale de la configuration spatiale existante (proximité de certaines zones, taux de croissance, accès aux différentes aménités...).

Références bibliographiques

- Batty M., 2001. Polynucleated Urban Landscapes, *Urban Studies*, Vol. 38, No. 4, pp. 635–655
- Banister D., 1992. "Energy use, transportation and settlement patterns", in Breheny M. J. (Ed) *Sustainable Development and Urban Form, European Research in Regional Science*, 2, pp. 160-181
- Barnsley M.F., 1988. *Fractals Everywhere*, Academic Press, New York.
- Benguigui L., Daoud M., 1991. "Is the suburban railway system a fractal?" *Geographical Analysis*, vol. 23, n°4, pp. 362-368.
- Breheny M. J., 1992. "Contradictions of the compact city: a review", in Breheny M. J. (Ed) *Sustainable Development and Urban Form, European Research in Regional Science*, 2, pp. 138-159.
- Breheny, M. J., 1997. "Urban compaction: feasible and acceptable?" *Cities*, 14, pp. 209-217.
- Cavallès J., Frankhauser P., Peeters D., Thomas I. 2004. Where Alonso meets Sierpinski: an urban economic model of fractal metropolitan area, *Environment and Planning A*, vol. 36, pp. 1471-1498.
- Christaller W., 1933. *Die zentralen Orte in Süddeutschland*, G. Fischer. Reproduction par la Wissenschaftliche Buchgesellschaft, 1980.
- Crane R., 1999. *The Impacts of Urban Form on Travel: A Critical Review*, Lincoln Institute of Land Policy, Working Paper, 44 p.
- Dantzig G., Saaty T., 1973. *Compact City: a Plan for a Liveable Urban Environment*, San Francisco, Freeman.
- Desse R.P., 2001. *Le nouveau commerce urbain. Dynamiques spatiales et stratégies des acteurs*, PUR, 198 p.
- Frankhauser, P., 1994. *La fractalité des structures urbaines*. Paris.
- Frankhauser P., 1998. "The fractal approach. A new tool for the spatial analysis of urban agglomerations", *Population: an English Selection*, Special issue *New methodological Approaches in the Social Sciences*, pp. 205-240.

- Frankhauser P. (dir.), 2003. *Morphologie des "Villes émergentes" en Europe à travers les analyses fractales*. Rapport de recherche, PUCA (chef de projet : G. Dubois-Taine), 242 p.
- Frankhauser P., 2005, « La Morphologie des tissus urbains et périurbains à travers une lecture fractale », *Revue Géographique de l'Est*, tome XLV, n°3/4, pp. 145-160
- Frankhauser P., Genre-Grandpierre C., 1998. La géométrie fractale, un nouvel outil d'analyse et de réflexion pour l'investigation des réseaux de transport. *Cahiers Scientifiques du Transport*, n°33, pp. 41-78
- Frankhauser P., Tannier C. (2005), *A multi-scale morphological approach for delimiting urban areas*, CUPUM 05: Computers in urban Planning and urban management, 9th conference organised by the CASA-UCL, 29 Jun – 1 July 2005, London. <http://www.cupum.org/>
- Fouchier V., 1999. Maîtriser l'Étalement Urbain : une Première évaluation des Politiques Menées dans Quatre Pays (Angleterre, Norvège, Pays-Bas, Hong-Kong), *2001 Plus (Synthèses et Recherches)*, n°49, D.R.A.S.T. Ministère français de l'Équipement, des Transports et du Logement.
- Garcia D., Riera P., 2003. Expansion versus Density in Barcelona: a valuation exercise, *Urban Studies*, vol. 40, n°10, pp. 1925–1936
- Genre-Grandpierre C., 2000. *Forme et fonctionnement des réseaux de transport : approche fractale et réflexions sur l'aménagement des villes*, Thèse de doctorat de géographie, Université de Franche-Comté, Besançon
- Genre-Grandpierre C., 1999. « La géométrie fractale : un outil de description des réseaux, des flux et de l'accessibilité », *Revue Géographique de l'Est*, tome XXXIX, n°4, pp. 169-178
- Genre-Grandpierre C., 1999. « La desserte spatiale des réseaux de transport routier : une approche fractale », *Flux*, n°38
- Gouyet J.-F., 1992. *Physique et structures fractales*, Masson
- Hall P., 1997. "The Future of the Metropolis and its Form", *Regional Studies*, n°31, vol.3, pp. 211-220.
- De Keersmaecker M.-L., Frankhauser P., Thomas I., 2003. "Using Fractal Dimensions for characterizing intra-urban diversity. The example of Brussels", *Geographical Analysis*, vol. 35, pp. 310-328.
- De Keersmaecker M.L., Frankhauser P., Thomas I., 2004, "Dimensions fractales et réalités périurbaines –L'exemple du sud de Bruxelles", *L'Espace Géographique*, vol. 3, 219-240.
- Moati P. Meublât O., Pouquet L., Ranvier M., 2005, « Enquête commerce 2005 - Comportements et attitudes des consommateurs à l'égard du commerce alimentaire », *Cahier de recherche CREDOC*, n°211, 143 p.
- Newman P.W.G., Kenworthy J.R., 1989. *Cities and Automobile Dependence: An International Sourcebook*, Gower, Aldershot/Brookfield, VT.
- Newman P.W.G., Kenworthy J.R., 1992. "Is there a role for physical planners?" *Journal of the American Planning Association*, 58, pp. 353-362.
- Owens S. E., 1992. "Land-use planning for energy efficiency", *Applied Energy*, 43, pp. 81-114
- Sievert, T., 1997. *Zwischenstadt*. Bauwelt Fundamente 118: Braunschweig, Wiesbaden, 173 p.
- Tannier C., Frankhauser P., 2006, "About the existence or non-existence of an urban envelope in the framework of a multi-scale approach", *Workshop MODUS (Modelling Urban Space) "About the emergence of complex forms and multi-scale patterns"*, ERG S4, 27th of April 2006, Paris <http://www.spatial-modelling.info/-MODUS-Modelling-Urban-Space->
- Tannier C., Pumain D., 2005. "Fractals in urban geography: a general outline and an empirical example", *Cybergeo : revue européenne de géographie*, n°307, 22 p. <http://www.cybergeo.presse.fr>
- Thibault S., Marchand A., 1987. *Réseaux et topologie*, Institut national des sciences appliquées de Lyon.
- Wiel M., Tauty S., Rollier Y., Morvan A., Le Guirriec P., Desse R.-P., Barthélémy J.-P., 1997, *Comportement de mobilité et évolution de l'organisation urbaine (région urbaine de Brest)*, Etude pour la DRAST, la DTT, l'UTP, le Plan urbain, 3 tomes, Agence de développement et d'urbanisme du pays de Brest, 295 p.