

Une approche multi-échelle de l'accessibilité pour maîtriser l'étalement urbain

¹Pierre Frankhauser, ²Cécile Tannier, ³Gilles Vuidel, ⁴Hélène Houot, Professeur à l'Université de Franche-Comté¹, Chargée de recherche au CNRS², Ingénieur d'étude en informatique³, Maître de Conférence à l'Université de Franche-Comté⁴. Tous les auteurs UMR CNRS 6049 ThéMA, Besançon, France

Abstract

Urban sprawl is often at the origin of diffuse settlement patterns generating important traffic flows since services are far away from residential areas. We present a new planning concept that optimizes accessibility to different types of amenities like services, but also natural and leisure areas. The social demand of households seeking for a residence close to natural space or simply individual housing is taken into account. The multiscale approach, inspired from fractal geometry, introduces different service levels and allows the concentration of residential areas in the vicinity of service centres. Moreover green areas of various size are preserved and well articulated with built-up areas which contributes to improve the quality of life. The methodology is applied to a mean-sized French agglomeration.

Introduction

La périurbanisation est souvent à l'origine d'un étalement diffus de l'habitat dans les espaces limitrophes des villes. Les conséquences de cette évolution sont multiples : augmentation du nombre et de la longueur des déplacements, morcellement de l'habitat, fragmentation des espaces naturels et agricoles. Dans le but de limiter ces effets néfastes, de nombreux auteurs militent en faveur de la ville compacte. Ils mettent en avant que celle-ci favorise l'utilisation des transports publics, permet une bonne accessibilité aux commerces et services et réduit la ségrégation sociale (cf. par exemple Dantzig et Saaty [10], Newman et Kenworthy, [26, 27]. Ceci se traduit par la mise en oeuvre de politiques de densification des zones urbaines et de tentatives pour contrer la périurbanisation, comme c'est le cas au Royaume-Uni à travers la protection des « ceintures vertes ».

Toutefois, ces politiques connaissent des limites mises en évidence par de nombreux auteurs [2,6,7,28]. En effet, la ville compacte a souvent pour corollaire une hausse des prix fonciers, une augmentation de la congestion des axes routiers et une réduction de l'accès aux espaces verts et naturels. En outre, les opérations de densification des zones résidentielles sont souvent contestées par les populations concernées [20,29,12].

La périurbanisation correspond en effet au choix d'un mode de vie et n'est pas seulement la conséquence d'un prix foncier plus bas dans les zones plus éloignées des villes. Bon nombre de résidents s'installant dans les zones périurbaines fuient la densité urbaine car ils souhaitent habiter dans une maison individuelle entourée d'un jardin, et bénéficier d'un environnement vert et calme. Il paraît donc utile d'intégrer cette demande sociale dans une stratégie d'aménagement, dont le but serait de « canaliser » la périurbanisation, au lieu de la refuser [3]. Dans ce contexte, la localisation de nouvelles constructions par rapport au réseau routier existant – et de façon plus générale la distance par rapport aux lieux régulièrement fréquentés – est un élément essentiel à prendre en compte. En effet, au-delà de la consommation énergétique et la pollution induites par les déplacements, la surface réellement consommée par la construction d'habitats reste relativement modeste par rapport à la surface consommée par de nouvelles infrastructures routières.

Ainsi, dans les franges franciliennes, entre 1987 et 1997, 1,4% de l'espace a été consommé par des bâtiments de type résidentiel et mixte, contre plus de 50% par des routes et plus de 25 % par des carrières et des chantiers [33].

Afin de limiter l'étalement diffus, certaines agglomérations européennes ont mis en place depuis longtemps une stratégie d'aménagement qui favorise l'utilisation des transports en commun. Cette politique se traduit par la définition d'axes de développement prioritaires le long des lignes de transport en commun. Un autre objectif est également de préserver dans les espaces interstitiels des zones naturelles qui peuvent accueillir des activités de loisirs. Citons comme exemple le fameux plan en « doigts de gants » de Copenhague (figure 1) ou les différents schéma d'aménagement de Berlin. Dans le deux cas, les zones urbanisées sont desservies par un réseau RER.

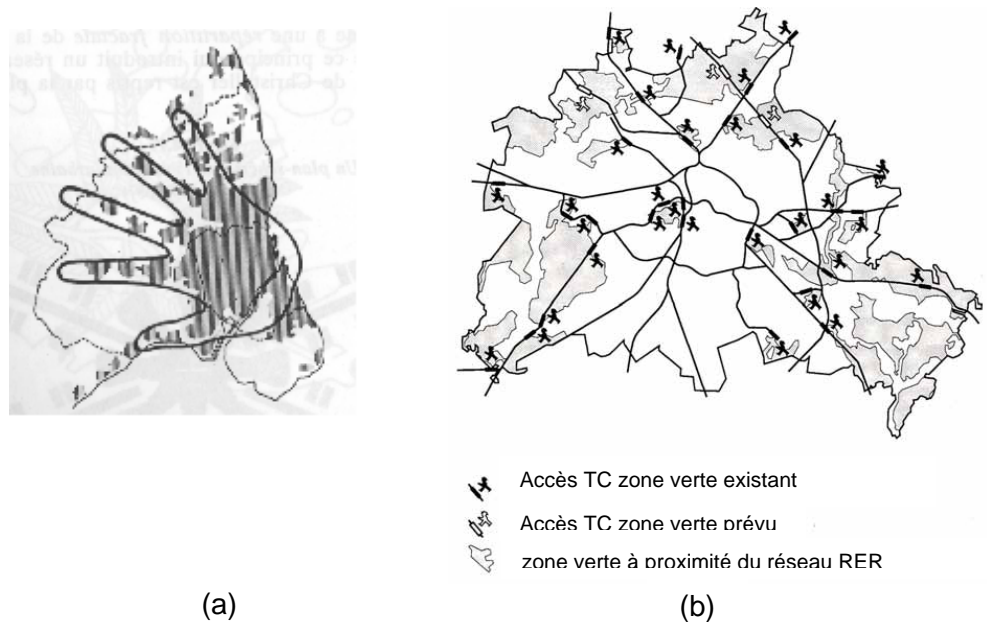


Figure 1 : Le plan de développement en « doigts de gants » pour l'agglomération de Copenhague (Source : Städtebauliches Institut, Stuttgart) (a) et l'accessibilité aux zones de loisir à Berlin (Source : Landschaftsprogramm Artenschutzprogramm 1994, Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umweltschutz-Abteilung III)

Cependant, le seul développement axial ne paraît pas suffisant pour assurer une structuration fonctionnelle à l'échelle des grandes agglomérations. Les nouveaux espaces urbains correspondent en effet à un système de peuplement rassemblant différents types et niveaux de fonctions. De ce fait, un développement polycentrique paraît nécessaire. Comme le fait remarquer Fouchier [12], le développement de centres secondaires semble indispensable à la réduction du trafic dans les agglomérations. Ceci a d'ailleurs été appliqué dans le concept anglo-saxon des « villages urbains », qui tente de créer une offre de services banaux à une échelle locale tout en localisant des fonctions commerciales et culturelles dans des sous-centres accessibles par des systèmes de transport à la demande [5]. Des réseaux de transport en commun plus classiques (RER ...) relient ces centres secondaires à la ville-centre, qui concentre les services rares, les centres de formation supérieure, etc. [12].

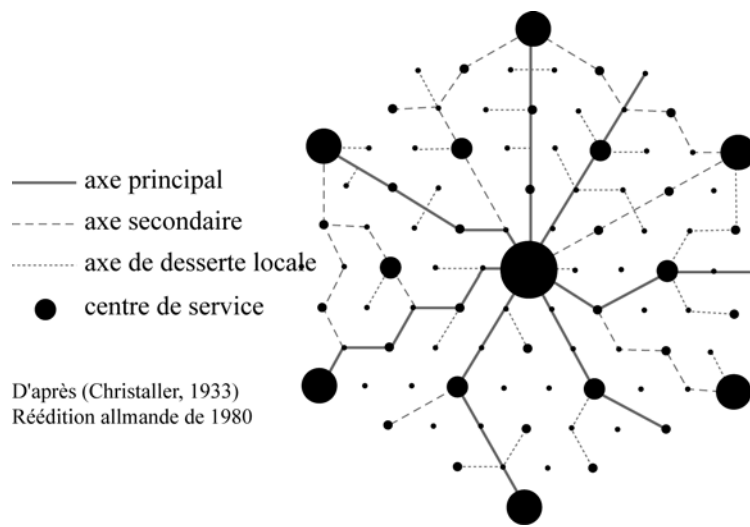
S'inscrivant dans cette logique, nous proposons un concept d'aménagement fractal des espaces périurbains qui permet d'optimiser l'accessibilité à différents types de commerces et services, ainsi qu'aux espaces verts, naturels et de loisir, tout en évitant le morcellement des zones bâties et non bâties (naturelles ou agricoles).

Optimiser l'accessibilité à différents types d'aménités à travers un concept d'aménagement fractal

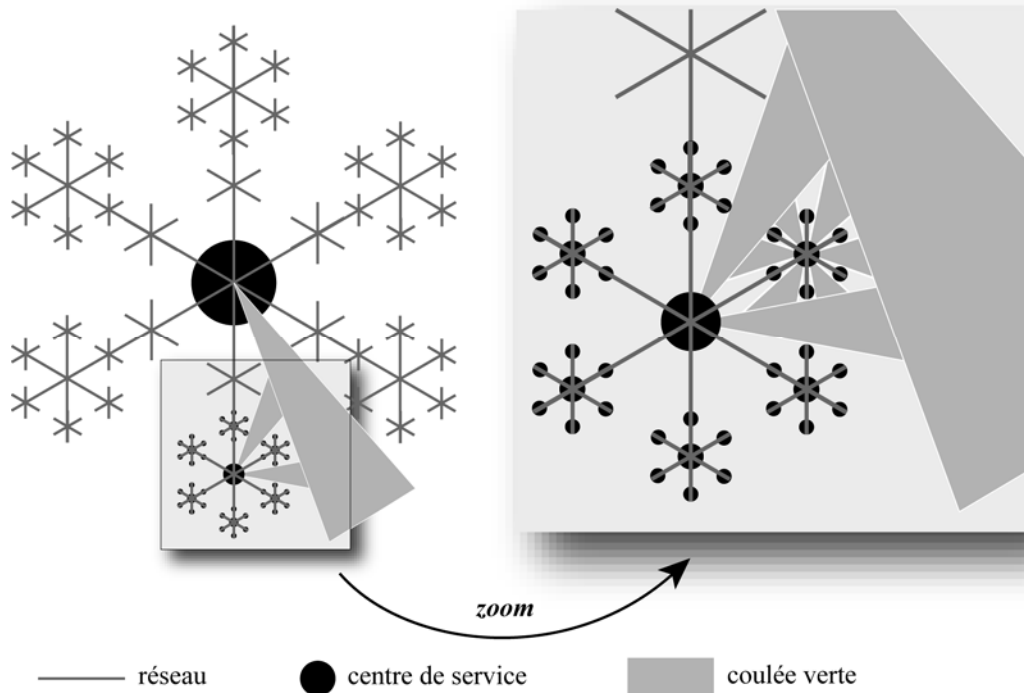
Introduire un système hiérarchique de villes qui distingue différents niveaux de service rappelle la logique de la théorie des lieux centraux [9], dont une illustration est fournie par la figure 2a. Ce modèle introduit un système hiérarchisé de services qui tient compte de leur fréquence de recours, mais le semis des habitats reste uniforme ce qui induit des distances assez importantes aux centres les plus proches offrant un certain niveau de services. Dans le modèle d'Isard [24] la répartition des habitats n'est plus uniforme, cependant les critères d'optimisation des coûts de transport sont basés sur les services et les activités industrielles et ne considèrent donc pas l'accès aux zones non construites, notamment récréatives.

La hiérarchie spatiale caractérise ces différents modèles et incite à appliquer cette même logique à la répartition des espaces non-bâties. La géométrie fractale génère, par définition, des structures spatiales multi-échelles, hiérarchisées. Il est possible de montrer l'intérêt d'utiliser cette approche en modifiant le schéma de Christaller selon une logique (multi)fractale (figure 2b). Dans ce modèle, nous avons rapproché les centres urbains secondaires de la ville-centre de taille immédiatement supérieure dans la hiérarchie des services. Ainsi, les centres secondaires sont plus proches des principaux axes de transport qui relient les espaces périphériques au centre principal situé au coeur du schéma. Comme les centres secondaires sont en même temps des points d'interconnexion du réseau de transport, la concentration des flux vers les axes de transport principaux permet d'imaginer la mise en place d'un système de transport en commun pertinent et une logique de rabattement vers ce réseau. Cette configuration permet aussi de ménager des coulées vertes qui pénètrent à de multiples endroits de l'agglomération. Les coulées vertes de taille importante peuvent être associées à des réserves naturelles, des zones rurales ou des zones de loisir, dont la fonction se situe à une échelle plutôt régionale. Elles séparent les aires de chalandises des centres urbains secondaires, ce qui réduit l'accessibilité aux centres offrant le même type de service et évite un morcellement des zones vertes. Finalement, ce schéma généralise les réflexions conceptuelles appliquées notamment à Copenhague et Berlin, en appliquant une logique d'organisation radioconcentrique aux sous-centres de différents niveaux. Les impacts économiques d'un modèle similaire ont été étudiés dans Cavailhès et al. [8].

Considérons maintenant un autre niveau d'analyse, celui de la répartition de la surface bâtie à l'échelle d'une ville ou d'un village périurbain. Le modèle de la ville compacte se manifeste souvent par des aménagements visant à lisser les bordures urbaines. Au contraire, notre modèle articule les zones habitées et le paysage ouvert en allongeant la bordure urbanisée, tout en évitant un morcellement des zones non-urbanisées. Ceci permet d'améliorer l'accessibilité aux zones de loisir tout en gardant un maximum de centralité.



(a)



(b)

Figure 2 : Le réseau des lieux centraux de Christaller (a) et un réseau hexagonal (multi)fractal (b). (Source :[18])

La figure 3 illustre cette possibilité à travers trois scénarios (a), (b) et (c) pour lesquelles une même surface bâtie est simplement répartie de façon différentes.

Le scénario (a) est celui d'une ville carrée, compacte, offrant peu de terrains situés en bordure de la ville, donc limitrophes au paysage ouvert. Dans le scénario (b), des poches non bâties pénètrent dans la surface bâtie ; la longueur de la bordure urbanisée est ainsi le double de celle du carré. Dans le scénario (c), de nouvelles petites poches « vertes » ont été ajoutées et la longueur de la bordure a encore doublé. Un tel allongement de la bordure, qui correspond à une logique fractale,

permet à un nombre important de personnes de s'implanter sur des parcelles situées en bordure de la ville et de bénéficier d'un contact direct avec le paysage ouvert, tant que les poches vertes préservées ne sont pas trop petites. Nous avons démontré que le gain d'accessibilité au paysage ouvert de ce modèle de ville est globalement plus important que la perte d'accessibilité au centre ville [16].

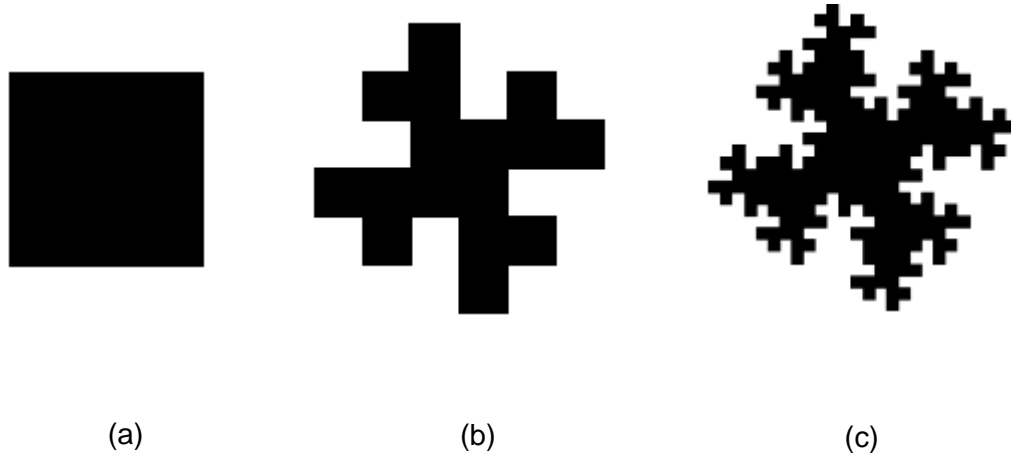


Figure 3 : Trois manières d'envisager la bordure urbaine :
du carré (a) au téragone (b et c) (d'après [25])

Ces deux exemples montrent que la géométrie fractale permet d'imaginer des modèles de villes qui amènent à réorienter l'aménagement des espaces urbains. Il est possible de travailler tant à partir de structures réseautiques, d'aspect linéaire (figure 2b), que de structures surfaciques (figure 3). Les deux modèles présentés constituent la base conceptuelle de la méthodologie proposée ci-après.

La méthodologie développée consiste à établir, dans un premier temps, un diagnostic de l'espace étudié est établi : on évalue l'accessibilité aux services des différents niveaux hiérarchiques, l'accès aux zones de loisir et au paysage ouvert, ainsi que la répartition du bâti, d'un point de vue multi-échelle. Des règles prédéfinies qui intègrent différents critères (accessibilité aux aménités urbaines et rurales, articulation entre bâti et paysage ouvert, non-fragmentation du bâti et des espaces non-bâties) servent ensuite à simuler différents scénarios de d'urbanisation. Nous avons appliqué cette méthodologie à une agglomération de taille moyenne, Besançon situé à l'Est de la France.

Une approche multi-échelle de l'accessibilité

La méthodologie mise en place sert à analyser l'accessibilité aux différents types d'aménités offertes aux résidents et à identifier les points qu'il serait utile d'améliorer et les potentialités de développement. Un objectif important est de proposer des scénarios d'aménagement qui permettent une réduction de la longueur totale des déplacements. Nous avons donc distingué différents types d'aménités « urbaines » (commerces et services) et « rurales » (espaces verts, naturels et de loisir) en tenant compte de leur fréquence de recours par les résidents.

Dans cet article, nous avons choisi de ne décrire que la méthodologie développée pour mesurer l'accessibilité aux commerces et services. Précisons toutefois que les mesures d'accessibilité aux espaces verts et naturels sont basées sur l'identification

des enveloppes d'ensembles morphologiques cohérents à travers les échelles [17]. L'accessibilité aux espaces verts et naturels via le réseau de transport est mesurée en définissant des critères d'accessibilité spécifiques à chaque type d'espaces [31].

Pour une ville de taille moyenne comme Besançon nous avons distingué trois niveaux de commerces et de service :

- Niveau 1 (recours quotidien ou pluri-hebdomadaire) : boulangerie, tabac/journaux, distributeurs bancaires, écoles et crèches, boucherie-charcuterie-traiteur, commerce alimentaire (supermarché, hypermarché, et, éventuellement, supérette pour les populations captives et surtout, en milieu urbain). Pour les services et commerces de ce niveau nous supposons qu'un accès à pied à partir du domicile est souhaitable. La portée maximale considérée est fixée à 400 m. [35].
- Niveau 2 (recours hebdomadaire) : marché, réparation automobile, vente de carburant, café, hypermarché (2 niveaux de fréquence de recours), épicerie-supérette, bibliothèque-médiathèque (non recensées). Ou lieu de fréquentation contrainte assez régulière : poste, pharmacie, médecin généraliste (on ne s'y rend pas forcément toutes les semaines, mais quand on doit s'y rendre, tout le monde doit y avoir accès assez facilement. Comme la littérature donne peu d'indication au sujet des distances préconisées nous suggérons d'identifier pour chaque commerce/service les bâtiments qui sont plus proches de ce commerce ou service que des autres établissements du même type, ce qui correspond à une aire de chalandise théorique. On détermine ensuite la distance maximale qui existe entre l'établissement considéré et les différents bâtiments de son aire de chalandise théorique. Ceci permet d'identifier la portée maximale de la distance à parcourir pour accéder à un service/commerce d'un certain type via un véhicule motorisé.
- Niveau 3 (recours mensuel et plus rare) : coiffeur, petites, moyennes et grandes surfaces spécialisées, 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, préfectures, impôts, hôpital, médecins spécialistes, laboratoires d'analyse médicale, hall d'exposition, magasins spécialisés, services et administrations de fréquentation rare, à destination d'un grand nombre de personnes. Comme le développement de nouveaux centres paraît peu probable pour le niveau 3, les distances associées à ce niveau conditionnent de façon essentielle le développement futur potentiel d'une commune. En effet une urbanisation trop lointaine d'un centre du niveau 3 ne paraît pas souhaitable. Des critères précis concernant cette distance n'ont pas encore été mis en place.

Analyser l'accès aux services à partir d'une logique fractale

Dans le réseau hexagonal fractal de lieux centraux présenté à la figure 2, les différents centres rassemblent les services et commerces de différents niveaux. Aux environs de ces centres, l'accessibilité assurée par le réseau baisse, car des espaces non desservis, dont la taille est de plus en plus grande, s'intercalent entre les branches du réseau. Cette baisse de l'accessibilité peut être caractérisée de manière multi-échelle par des indicateurs fractals, l'objectif étant d'évaluer dans quelle mesure l'organisation spatiale des réseaux de transport suit une logique fractale.

Outre le recours à des méthodes d'analyse fractale courantes, nous avons également développé de nouvelles méthodes adaptées au contexte donné. Ces analyses ne se limitent pas à la seule mesure d'indicateurs fractals, mais sont aussi

utilisées pour localiser des zones de développement potentiel. Les analyses ont été réalisées en utilisant le logiciel *Fractalyse 2.4* [34].

Le point de départ est de considérer la localisation de différents types de commerces et services dans une agglomération. Pour chaque localisation, il est possible de mesurer son accessibilité par le réseau de transport. Deux premières méthodes (analyse radiale du réseau et analyse fractale d'accessibilité) mettent en évidence l'accessibilité au commerce ou service potentiellement fournie par le réseau, sans considérer la présence réelle d'habitations, la troisième méthode (analyse fractale de desserte) met en relation le réseau et les bâtiments réellement desservis.

Ces trois méthodes ont essentiellement été appliquées aux services et commerces du niveau 1. Nous illustrons la méthodologie à travers l'exemple de Saône qui correspond à un centre secondaire du niveau 2 et dont la qualité d'accès à Besançon permet un certain développement futur.

L'analyse radiale du réseau

L'analyse radiale est une des méthodes standards utilisées pour analyser les propriétés fractales de structures spatiales. Elle a été appliquée par différents auteurs pour analyser les réseaux de transport [32,4,1,15,21,22]. La procédure est la suivante : on choisit un point de comptage, dans notre cas un commerce ou service, puis on détermine la longueur totale $N(\varepsilon)$ du réseau, qui se trouve à une distance inférieure à une distance donnée ε de ce point. Cette opération est répétée pour des distances ε croissantes. On représente la courbe $N(\varepsilon)$ en fonction de ε . Si le réseau étudié est fractal, cette courbe doit suivre une fonction puissance. L'exposant de cette fonction correspond à la dimension fractale D qui décrit le degré de hiérarchisation du réseau étudié. Si le réseau couvre l'espace de manière uniforme, comme le fait une grille à maillage régulier, on obtient une valeur $D = 2$. En revanche, un réseau fractal, dont la dimension serait $D < 2$, irrigue l'espace de manière inégale, selon un principe hiérarchique : il existe peu de grands espaces non desservis par le réseau, mais un nombre croissant d'espaces de taille de plus en plus petite, qui ne sont pas desservis (cf. coulées vertes dans la figure 2b). La dimension $D = 1$ caractérise un réseau strictement linéaire.

L'analyse radiale met en évidence la structure radioconcentrique d'un réseau. Ainsi, pour la fractale de la figure 4b, la courbe d'analyse la plus régulière est obtenue en choisissant le nœud le plus central comme point de comptage. L'aspect de la courbe d'analyse permet d'évaluer dans quelle mesure la localisation d'un service est optimale par rapport à une logique radioconcentrique. La dimension D_{rad} indique dans quelle mesure l'accessibilité au service assurée par le réseau diminue en s'éloignant du service, en raison de la présence d'espaces de plus en plus grands qui ne sont traversés par aucune branche du réseau. Le réseau étant caractérisé par ses propriétés multi-échelles, l'information obtenue par la dimension fractale est bien différente de celle fournie par la densité.

L'analyse fractale d'accessibilité

L'analyse fractale d'accessibilité, souvent désignée dans la littérature par l'expression d'analyse d'étalement [23,21], suit une logique semblable à l'analyse radiale du réseau, mais les distances λ sont cette fois mesurées sur le réseau. Dans le cas d'un réseau fractal, une loi de puissance relie le nombre total de lieux accessibles par le réseau à la distance λ . L'exposant scalant de cette fonction donne la dimension d'accessibilité locale D_{acc} . Les points de comptage correspondent toujours à des commerces et services localisés.

L'analyse fractale d'accessibilité considère le fait qu'un réseau peut être à la fois ramifié et tortueux [23] : si les branches sont tortueuses on atteindra, pour une valeur de distance λ donnée, moins de sites qu'on aurait atteint si on avait utilisé la même valeur de distance euclidienne ε dans l'analyse radiale (cf. figure 5). Ceci explique la relation $D_{acc} \leq D_{rad}$ où l'égalité entre les deux dimensions est atteinte uniquement dans le cas de réseaux ramifiés, mais non tortueux, tels que celui présenté en figure 4b.

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

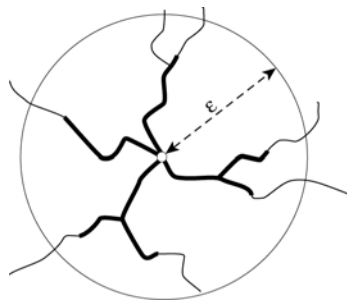


Figure 5 : Illustration de la différence entre une distance euclidienne ε et la même distance λ mesurée sur le réseau (source :[31]).

La figure 6 montre l'application de l'analyse radiale (a) et l'analyse d'accessibilité (b) à une boulangerie située au cœur de Saône. A partir des inflexions des courbes d'analyse, il est possible d'identifier sur les représentations cartographiques correspondants les distances euclidiennes (a) ou mesurées sur le réseau (b) pour lesquelles l'accessibilité baisse. Cette distance se situe à environ 1130 m. de la boulangerie, mesurée sur le réseau ; elle correspond à peu près à la limite de la zone urbanisée. L'aspect régulier des courbes pour la zone intra-urbaine signifie que la boulangerie est bien située au regard d'une logique d'accessibilité radioconcentrique. Par ailleurs, le réseau n'est pas très tortueux (résultats similaires obtenus pour les analyses radiales et d'accessibilité).

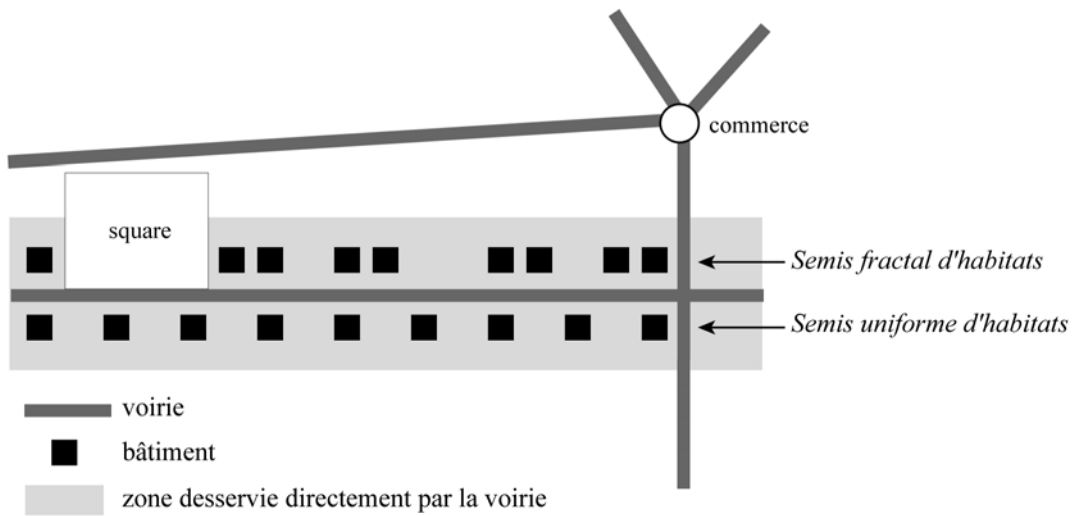


Figure 6 : Application des deux méthodes d'analyse à une boulangerie située au centre de Saône. Le carré indiqué en (a) correspond à la zone pour laquelle l'analyse radiale indique un comportement fractal du réseau, En (b) la partie du réseau en gras coïncide avec la distance limite mesurée sur le réseau pour laquelle l'analyse d'accessibilité identifie une organisation fractale du réseau (source :[31])

L'analyse fractale de desserte

Le bâti dans une ville n'est pas nécessairement réparti uniformément le long de la voirie. Il peut former des groupes de bâtiments séparés par des espaces non construits de taille variable. Si la taille des espaces non construits suit une logique hiérarchique, on retrouve de nouveau un principe d'organisation fractal (cf. figure 7), une telle distribution hiérarchique pouvant d'ailleurs être favorable à l'implantation d'équipements collectifs. Une fonction puissance permet de représenter la relation entre le nombre de bâtiments desservis et une distance λ à un service donné mesurée sur le réseau. Nous désignons l'exposant de cette relation comme *dimension fractale de desserte*. Elle caractérise la desserte réelle de bâtiments assurée par le réseau. Si le bâti est réparti uniformément le long du réseau, $D_{des} = D_{acc}$ (pour la démonstration cf. [31]).

La comparaison des courbes d'analyse d'accessibilité et de desserte est particulièrement intéressante. La figure 8a présente les deux courbes obtenues pour le village de Saône. Celles-ci sont presque identiques à l'intérieur de la zone urbanisée, Ceci indique que le bâti est uniforme le long du réseau et qu'il reste peu d'espaces urbanisables le long du réseau, suivant une organisation multi-échelle. La situation est très différente pour une pharmacie située dans autre village périurbain de Besançon, Châtillon-le-Duc (figure 8b). Le fort décalage entre les deux courbes montre qu'il existe des zones peu urbanisées le long d'une grande partie du réseau. En outre, la courbe de desserte est assez irrégulière. L'absence de raison fonctionnelle pour ce déficit de bâti (squares, places...) permet de conclure que le bâti n'est pas réparti de manière fractale le long du réseau. L'urbanisation autour de la pharmacie n'est pas en cohérence avec le réseau et celle-ci apparaît assez mal positionnée par rapport au réseau et aux habitations.



Extension d'un semis linéaire d'habitats suivant une logique fractale



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

Figure 7 : Répartition uniforme et fractale des habitations le long d'un réseau routier. (Source : [31])

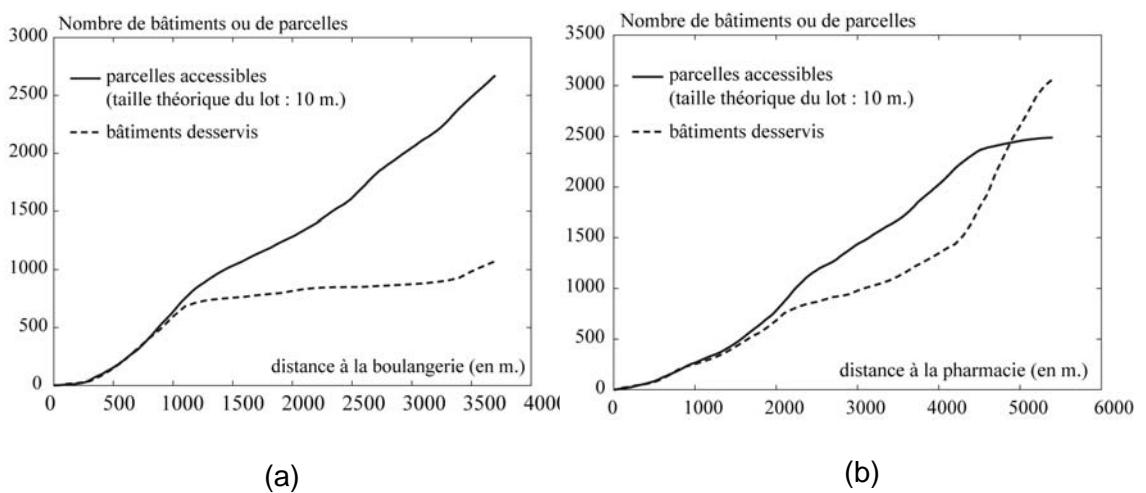


Figure 8 : Courbes de l'analyse d'accessibilité et de desserte pour une boulangerie de Saône (a) et une pharmacie de Châtillon-le-Duc (b). (Source : [18])

La décomposition fractale du tissu bâti existant

Ici, l'objectif n'est pas d'obtenir une courbe d'analyse, mais de visualiser et d'analyser la répartition spatiale du bâti à travers une approche multi-échelle. La décomposition fractale est basée sur la logique de la couverture d'un ensemble [11]. Elle sert de base à la simulation de scénarios d'urbanisation future. Nous illustrons la méthode encore une fois à travers l'exemple de Saône.

Après avoir sélectionné une zone d'étude, on la couvre d'une grille constituée de $\nu \times \nu = \nu^2$ mailles quadratiques que nous désignons par l'expression « mailles d'ordre 1 ». Puis, chaque maille d'ordre 1 est décomposée en $\nu \times \nu$ mailles de taille réduite que nous appelons d'ordre 2. La zone d'étude contient alors ν^4 mailles d'ordre 2. Cette opération est répétée jusqu'à ce que la taille des mailles s'approche de celle des bâtiments (figure 9).

Pour chaque maille d'ordre (i), nous comptons le nombre $N^{(i+1)}$ de mailles d'ordre ($i+1$) qui contiennent du bâti. Ceci nous permet de calculer, pour chaque étape de décomposition, le nombre moyen de cellules urbanisées (ou mailles d'ordre ($i+1$)) par maille d'ordre (i). La moyenne géométrique de ce nombre pour l'ensemble des étapes de décomposition fournit le deuxième paramètre (N_{emp}). Avec les deux paramètres, ν et N_{emp} , il est possible de calculer la dimension fractale du bâti

$$D_{emp} = \frac{\log N_{emp}}{\log \nu}.$$

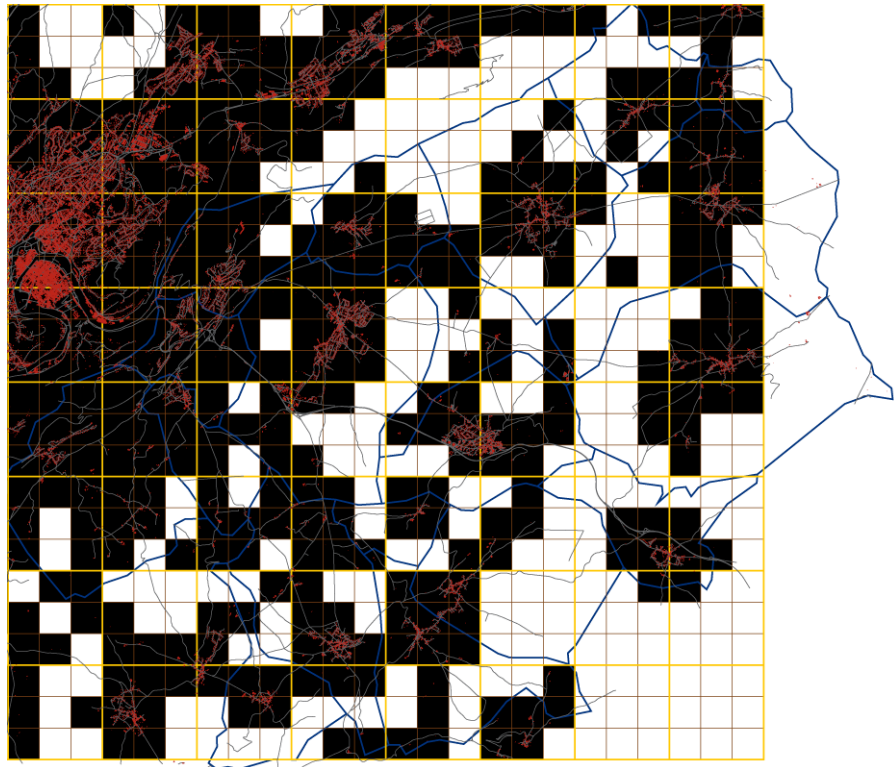


Figure 9a. La décomposition fractale du secteur de Saône (maille de 440 mètres).
(Source : [19])

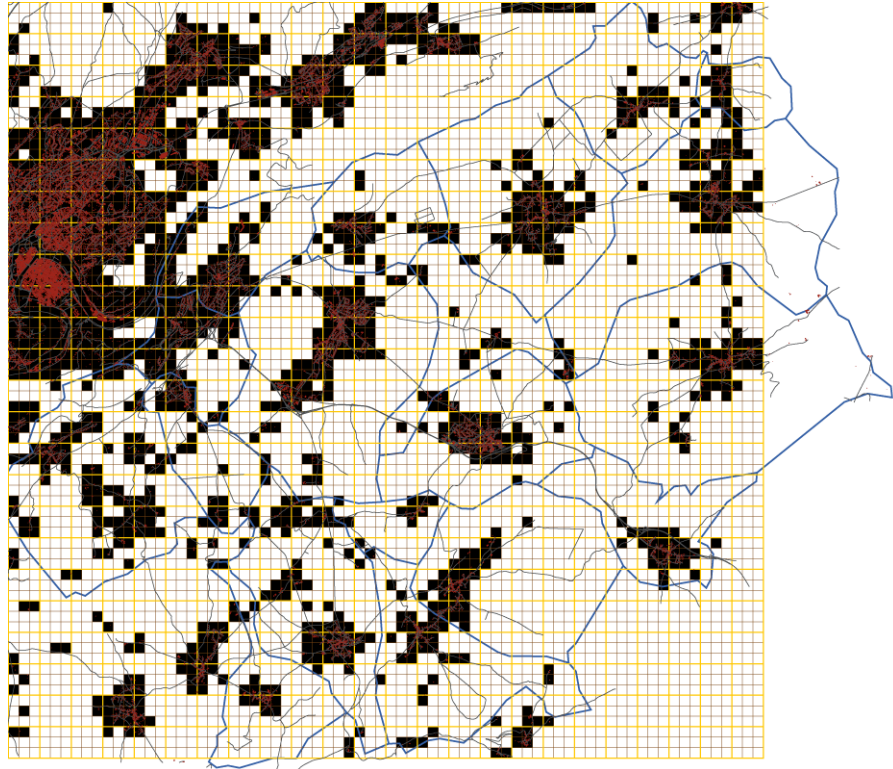


Figure 9b. La décomposition fractale du secteur de Saône (maille de 147 mètres).
(Source : [19])

Les normes et les règles d'évaluation présidant à la simulation de scénarios d'urbanisation

Nous disposons maintenant des éléments qui permettent de simuler des scénarios d'urbanisation à partir d'une logique fractale. Rappelons que le but est d'obtenir des scénarios qui optimisent simultanément l'accès à des services de différents niveaux et au paysage ouvert (zones de loisir), en limitant la fragmentation des espaces bâtis et non bâtis. Nous prenons en compte :

- les caractéristiques du tissu bâti existant et son articulation avec le paysage ouvert,
- les caractéristiques du réseau de transport et l'accessibilité multi-échelle aux services,
- des normes et des règles prédéfinies concernant l'urbanisation des espaces.

Les simulations s'appuient directement sur la décomposition fractale du bâti. La grille introduite sert à identifier à chaque échelle quelles sont les mailles potentiellement constructibles. Les résultats des analyses d'accessibilité et de desserte permettent de sélectionner les mailles les plus intéressantes parmi l'ensemble des mailles potentiellement constructibles. Ainsi les espaces caractérisés par une bonne accessibilité, mais en déficit de bâtiments, sont considérés comme urbanisables en priorité.

En fonction de la grille adoptée (choix d'une valeur de ν) et d'une dimension fractale fixée D , il est possible de calculer un nombre maximal $N = \nu^D$ de cellules qui peuvent être bâties dans chaque maille de la grille :

- On peut choisir la dimension fractale D du tissu bâti étudié (D_{emp}). Alors N_{emp} est le nombre maximal de cellules pouvant être bâties suivant strictement la logique du tissu bâti existant.
- La dimension fractale D choisie peut aussi correspondre à une limite fixée (D_{lim}), le nombre maximal $N_{lim} = \nu^{D_{lim}}$ de cellules constructibles à chaque échelle correspondant alors à une référence "absolue". Comme nous cherchons une bonne articulation multi-échelle du tissu bâti et du paysage ouvert, nous préconisons pour des espaces périurbains des valeurs de la dimension fractale qui se situent dans la fourchette $[1,5 ; 1,8]$ ce qui donne la possibilité à la fois de faire pénétrer des coulées vertes dans la surface bâtie et de conserver des espaces non urbanisés de taille suffisamment importante. Si nous utilisons comme facteur de couverture $\nu = 3$, on obtient pour les nombres N_{norm} suivants :

D	N_{norm}
1,46	5
1,63	6
1,77	7
1,89	8

Tableau 10. Relation entre la dimension fractale et N pour $\nu = 3$

La simulation consiste à transformer des cellules non bâties en cellules bâties, pour les différentes étapes de maillage déterminées par la décomposition fractale. En comparant à N_{emp} à N_{lim} , il est possible de déterminer à chacune de ces étapes pour chaque maille si la densification du tissu bâti peut être réalisée ou si le bâti est trop compact pour l'envisager.

Les exigences en matière d'accessibilité se traduisent essentiellement à travers une évaluation qualitative de l'allure des courbes d'analyses et leur comparaison selon la logique déjà présentée. Une courbe régulière traduit une baisse radioconcentrique de la densité du réseau à partir d'un commerce ou service. Deux phénomènes peuvent être à l'origine d'une courbe irrégulière :

1. la localisation du service est incohérente par rapport à la morphologie du réseau. Ceci est essentiellement le cas si le service n'est pas localisé dans un nœud du réseau. Cette vérification peut facilement être réalisée. En ce qui concerne la répartition du bâti, une courbe irrégulière met en évidence une localisation excentrée du service/commerce par rapport aux endroits où la masse bâtie est concentrée ;
2. la position paraît bonne, mais le réseau (ou le bâti) montre une baisse non continue de la densité du réseau à partir du point de comptage.

En fonction de ce diagnostic, les conséquences sont différentes : dans le cas 1 une amélioration pourrait être obtenue par un déplacement du service ; dans le cas 2 une densification paraît possible à certains endroits. Il est évident que la définition de zones constructibles ne peut pas se référer à la présence d'un seul service. Il est donc important de considérer la dispersion des services et commerces. Celle-ci peut être identifiée par les représentations cartographiques des aires de chalandise théoriques qui se réfèrent aux normes d'accessibilités introduites. Rappelons en outre que la présence de zones non bâties à l'intérieur du tissu bâti peut révéler la présence d'espaces publics intraurbains auquel cas une vérification s'impose.

Un aspect intéressant, à l'échelle des aires de chalandises théoriques des services et commerces du niveau 2, est la considération de la connectivité du réseau par rapport à d'autres centres du même niveau. Conformément au schéma de Christaller modifié (Figure 2), nous ne favorisons pas un maillage important entre les lieux qui concentrent les services et commerces du niveau 2.

Le tableau ci-après synthétise les objectifs d'aménagement énoncés précédemment sous forme de règles.

	Intitulé de la règle à appliquer à chaque maille d'ordre $i + 1$ lors du passage de l'étape i à l'étape $i+1$	priorité
1	Le nombre total de mailles construites et constructibles ne doit pas dépasser le nombre N_{norm} fixé au départ à travers la valeur choisie de la dimension fractale	priorité 1
2	La taille de chaque commune ne devrait pas dépasser le seuil qui correspond à sa fonction (ces normes ne sont à l'heure actuelle pas définies/cette règle reste à préciser)	priorité 2
3	Une priorité pour l'urbanisation doit être donnée aux mailles d'ordre i qui se situent dans les zones de bonne accessibilité aux services et commerces montrant un déficit de bâti (comparaison des courbes de l'analyse d'accessibilité et de l'analyse de desserte) – cf. figure 30	priorité 1
4	La maille doit être voisine d'une maille déjà construite ou constructible (bâti continu, dans le but d'éviter un morcellement du bâti) (<i>référence au téragone</i>)	priorité 1
5	La cellule doit être traversée d'un réseau routier existant, ou voisine d'une cellule traversée d'un réseau existant	priorité 2
6	La maille doit être voisine d'une maille non construite. En la convertissant en maille bâtie, elle ne doit pas obstruer l'accès au paysage des mailles voisines déjà bâties (accès direct du bâti continu au paysage ouvert) (<i>référence au téragone</i>)	priorité 2
7	Préservation de la contiguïté des zones non construites	priorité 1
8	L'accès aux services et commerces existants de niveau 1 ne doit pas excéder 400 m.	priorité 3
9	L'accès aux services et commerces de niveau 2 ne doit pas excéder une distance à définir (<i>référence au schéma christallérien modifié</i>)	priorité 3
10	L'accès aux services et commerces de niveau 3 ne doit pas excéder une distance à définir (<i>référence au schéma christallérien modifié</i>)	priorité 1
11	Une cellule est inconstructible si elle se trouve dans une zone naturelle protégée. D'autres contraintes sont possibles (utilisation agricole, relief...)	priorité 1
12	La construction de nouvelles routes n'est pas conseillé, Le but est d'éviter un maillage routier entre les aires de chalandise théoriques du niveau 2.	priorité 2

<p>Priorité 1 : règle impérative Priorité 2 : règle préconisée mais soumise à arbitrage Priorité 3 : règle est préconisée, mais elle pouvant être outrepassée, si la création de services est prévue. Cette création doit suivre les règles d'accessibilité définies.</p>

Tableau 1 : règles présidant à la simulation

Un exemple de simulation

Nous présentons un scénario simulé pour le secteur de Saône, bourg-centre pour lequel :

- les services sont assez concentrés au centre et donc bien **accessibles** selon les critères définis pour le niveau 1.
- l'aire de chalandise théorique des services du niveau 2 paraît cohérente.

- Le niveau 3 est accessible par une liaison ferroviaire et routière directe à une distance acceptable (11 km).

La simulation procède par étape, des mailles d'ordre 1 aux mailles d'ordre 2, puis d'ordre 3, etc. Elle respecte les normes d'aménagement précédemment introduites. Ainsi la dimension fractale retenue est $D = 1,63$ ce qui est en cohérence avec l'ordre de grandeur de la valeur observée. Cette valeur correspond à $N = 6$ mailles d'ordre $i+1$ occupées dans une maille d'ordre i . Ceci implique que dans les zones urbanisées l'ajout de bâti se limite à un nombre restreint de mailles pour lesquelles

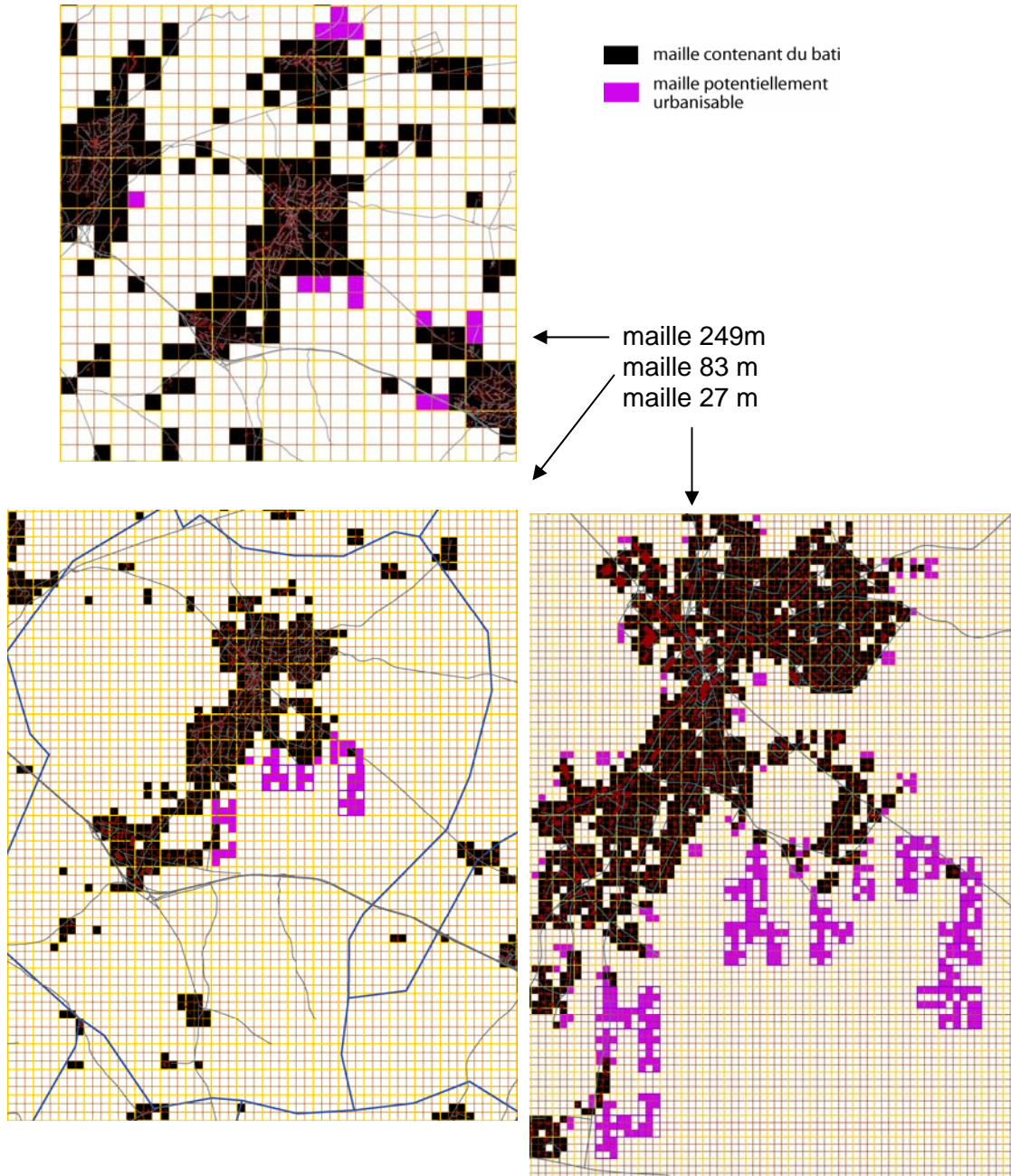


Figure 10 Un scénario de développement potentiel autour de Saône à trois échelles consécutives. Les mailles identifiées à l'étape précédente sont représentées en gras. (Source : [19])

le nombre $N = 6$ n'est pas atteint. Dans d'autres cas, par exemple dans les centres denses, on vérifie que la norme est déjà dépassée et une densification est alors strictement exclue. Soulignons qu'il s'agit d'un scénario d'urbanisation parmi d'autres ; il est évident qu'il existe un grand nombre de scénarios qui respectent chacun les règles et normes d'aménagement fixés.

Dans cette simulation, la construction de certaines branches de réseau a été acceptée, car l'ajout de tronçons de voirie permet de rendre les zones urbanisées plus compactes. Nous avons respecté la situation géographique et, en particulier, les contraintes naturelles. Ainsi toute construction a été exclue dans les zones boisées qui contiennent aussi des zones marécageuses protégées à l'ouest de Saône. En outre, la présence d'un aérodrome au Sud-Est a empêché de prévoir des constructions dans cette zone qui serait pourtant intéressante car située à proximité d'une zone commerciale du niveau 2 et proche de l'axe routier qui relie le secteur à Besançon, ainsi que d'une gare SNCF.

A l'échelle d'une commune, la différence entre la méthode de travail proposée et la démarche traditionnelle d'aménagement qui s'appuie sur le principe du zonage apparaît particulièrement évidente. En effet, le principe du zonage se réfère à une seule échelle, tandis qu'ici les règles introduites sont simultanément appliquées à toutes les échelles. Ceci permet d'éviter les effets d'uniformité que l'on trouve souvent à l'intérieur des lotissements ; la conception urbanistique devient ainsi plus variée et riche. En outre une densification est proposée à des endroits précis à partir d'une réflexion sur l'environnement résidentiel qui inclut différentes échelles jusqu'à celle du bâtiment.

Conclusion

L'approche présentée dans cet article permet d'aider à l'aménagement du territoire à l'échelle d'une agglomération, en limitant les effets néfastes de l'étalement urbain sans pour autant rejeter celui-ci. En s'inspirant de modèles fractales, une méthodologie a été mise en place pour développer des scénarios **d'urbanisation future**. Elle s'appuie sur une évaluation de l'état actuel de l'accessibilité aux services de différents niveaux et au paysage ouvert, et permet d'analyser la cohérence entre le bâti et le réseau de transport à travers une méthode spécifique, la décomposition fractale. Il reste maintenant à préciser et quantifier les différentes règles de simulation pour proposer un véritable outil d'aide à la décision opérationnel informatisé.

Remerciements

Ce projet de recherche a été financé par le *Programme français de recherche et d'innovation dans les transports terrestres 3 (PREDIT 3)* (<http://thema.univ-fcomte.fr/rubrique214.html>). Les données nécessaires (BD topo IGN) ont été mises à disposition dans le cadre d'une convention associant l'AUDAB (Agence d'Urbanisme de l'Agglomération de Besançon) à ThéMA pour le contrat PREDIT précité.

Références

- [1] M. Batty, and P. Longley : *Fractal Cities: a Geometry of Form and Function*. London and San Diego: Academic Press, (1994).

- [2] D. Banister : « Energy use, transportation and settlement patterns », in M. J. Breheny, (Ed) *Sustainable Development and Urban Form, European Research in Regional Science*, 2, pp. 160-181, (1992).
- [3] F. Beaucire, S. Rosales-Montano, E. Duflos et I. Turchetti : *Les outils de planification urbaine au service de la relation urbanisme/transport : approche dans la perspective du développement durable*, Synthèse de recherche, Projet DRAST/ PREDIT 98MT115, Fédération Nationale des Agences d'Urbanisme, Mai 1999, 20 p., (1999).
- [4] L. Benguigui et M. Daoud : « Is the suburban railway system a fractal? », *Geographical Analysis*, **23**(4), pp. 362-368, (1991).
- [5] G. Billard : « Un nouvel agencement de l'environnement urbain pour une nouvelle forme d'organisation sociale ? Exemple de Seattle à travers la stratégie des Villages urbains », *Annales de géographie*, **611**, pp. 84-93, (2000).
- [6] M. J. Breheny : « 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, (1992).
- [7] M. J. Breheny : « Urban compaction: feasible and acceptable? », *Cities*, 14, pp. 209-217, (1997).
- [8] J. Cavailhès, P. Frankhauser, D. Peeters. et I. Thomas : « Where Alonso meets Sierpinski: an urban economic model of fractal metropolitan area », *Environment and Planning A*, **36**, pp. 1471-1498, (2004).
- [9] W. Christaller : *Die zentralen Orte in Süddeutschland*, G. Fischer. (1933),
Reproduction par la Wissenschaftliche Buchgesellschaft, (1980).
- [10] G. Dantzig et T. Saaty : *Compact City: a Plan for a Liveable Urban Environment*, Freeman, San Francisco, (1973).
- [11] K. J. Falconer : *The geometry of fractal sets*, Cambridge Tracts in Mathematics Series - 85, Cambridge University Press, Cambridge NY, (1985).
- [12] V. Fouchier (1995) : « La densification : une comparaison internationale entre politiques contrastées », *Les Annales de la Recherche Urbaine*, **67**, pp. 95-108.
- [13] P. Frankhauser : *La fractalité des structures urbaines*. Anthropos, Paris (1994).
- [14] P. Frankhauser : « 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, (1998).
- [15] P. Frankhauser (dir.) : *Morphologie des « Villes émergentes » en Europe à travers les analyses fractales*. Rapport de recherche, PUCA (chef du projet : G. Dubois-Taine), 242 p. (2003).
- [16] P. Frankhauser et C. Genre-Grandpierre : « La géométrie fractale, un nouvel outil d'analyse et de réflexion pour l'investigation des réseaux de transport », *Cahiers Scientifiques du Transport*, 33, pp. 41-78, (1998).

- [17] P. Frankhauser. et C. Tannier : A multi-scale morphological approach for delimiting urban areas', présenté au colloque CUPUM 05 Computers in Urban Planning and Urban Management, 9th conference, organisé par le CASA-UCL, Juin 2005, London. <http://www.cupum.org/>, (2005).
- [18] P. Frankhauser, C. Tannier, G. Vuidel, H. Houot : *Approche fractale de l'urbanisation, Méthodes d'analyse d'accessibilité et simulations multi-échelles*, acte de la 11thWorld Conference on Transportation Research, Berkeley, USA, (2007).
- [19] P. Frankhauser (dir.), H. Houot, C. Tannier, G. Vuidel : *Vers des déplacements péri-urbains plus durables : propositions de modèles fractals opérationnels d'urbanisation*, Rapport de recherche projet PREDIT - Programme français de recherche et d'innovation dans les transports terrestres, (2007).
- [20] D. Garcia, et P. Riera : « Expansion versus Density in Barcelona: a valuation exercise », *Urban Studies*, 40(10), pp. 1925–1936, (2003).
- [21] C. Genre-Grandpierre : « La desserte spatiale des réseaux de transport routier : une approche fractale », *Flux*, 38, pp. 56-68 (1999).
- [22] C. Genre-Grandpierre : *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, (2000).
- [23] J.-F. Gouyet : *Physique et structures fractales*, Masson, Paris, (1992)
- [24] W. Isard : *Location and Space Economy*, MIT Press, Cambridge (USA), (1956).
- [25] B. Mandelbrot : *The Fractal Geometry of Nature*. Freeman, San Francisco. (1983).
- [26] P.W.G. Newman et J.R. Kenworthy : *Cities and Automobile Dependence: An International Sourcebook*, Gower, Aldershot/Brookfield, VT (1989).
- [27] P.W.G. Newman et J.R. Kenworthy : « Is there a role for physical planners? » *Journal of the American Planning Association*, 58, pp. 353-362, (1992).
- [28] S. E. Owens : « Land-use planning for energy efficiency », *Applied Energy*, 43, pp. 81-114, (1992).
- [29] J. Remy : « La ville: réseau alvéolaire et mobilité spatiale », in : Pellegrino, P. (ed) *Figures architecturales – formes urbaines*, Anthropos, Genève, (1994).
- [30] C. Tannier et P. Frankhauser : « 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, Avril 2006, Paris <http://www.spatial-modelling.info/-MODUS-Modelling-Urban-Space->, (2006).
- [31] C. Tannier, P. Frankhauser, H. Houot et G. Vuidel : « Optimisation de l'accessibilité aux aménités urbaines et rurales à travers le développement de modèles fractals d'urbanisation », *Développement local, compétitivité et attractivité des territoires : XLII^{ème} Colloque de l'ASRDLF – XII^{ème} Colloque du GRERBAM*, Sfax, 4-6 Septembre 2006, 29 p., (2006).

- [32] S. Thibault et A. Marchand : *Réseaux et topologie*, Institut national des sciences appliquées de Lyon , (1987).
- [33] F. P. Tourneux : « L'évolution de l'occupation du sol dans les franges franciliennes : des artificialisations concentrées plus qu'un étalement urbain ? », in A. Larceneux et C. Boiteux-Orain (dir.) *Paris et ses franges : étalement urbain et polycentrisme* Editions universitaires de Dijon, collection Sociétés, Dijon, pp. 101, (2006).
- [34] G. Vuidel, P. Frankhauser et C. Tannier : *Fractalyse 2.4*, logiciel téléchargeable librement à l'adresse <http://fractalyse.org/>, (2006).
- [35] M. Wiel, S. Tauty, Y. Rollier, A. Morvan, P. Le Guirriec, R.-P. Desse. et J.-P. Barthélémy : *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, 2, (1997).