



HAL
open science

Délimitation d'ensembles morphologiques par une approche multi-échelle

Cécile Tannier, Gilles Vuidel, Pierre Frankhauser

► **To cite this version:**

Cécile Tannier, Gilles Vuidel, Pierre Frankhauser. Délimitation d'ensembles morphologiques par une approche multi-échelle. Huitièmes Rencontres de Théo Quant, ThéMA, CNRS-Université de Franche-Comté, Jan 2007, Besançon, France. pp.14. halshs-00461657

HAL Id: halshs-00461657

<https://shs.hal.science/halshs-00461657v1>

Submitted on 5 Mar 2010

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Délimitation d'ensembles morphologiques par une approche multi-échelle

Application à la délimitation morphologique des agglomérations

Cécile Tannier, Gilles Vuidel, Pierre Frankhauser

Laboratoire ThéMA UMR 6049, CNRS/Université de Franche-Comté

32, rue Mégevand – 25000 Besançon, France

cecile.tannier@univ-fcomte.fr

gilles@vuidel.org

pierre.frankhauser@univ-fcomte.fr

MOTS-CLÉS

Tissus bâtis
Espaces urbains
Limites
Fractale
Dilatation
Courbure

RÉSUMÉ

Cet article s'intéresse à l'identification de l'enveloppe de tissus bâtis, que nous définissons comme la limite d'un ensemble présentant une structure spatiale cohérente à travers les échelles. Nous abordons cette question d'un point de vue purement morphologique, dans le cadre d'une approche multi-échelle. Après avoir, dans un premier temps, posé le contexte de la recherche, nous présentons les principes méthodologiques à la base de l'identification de l'enveloppe de tissus bâtis. La première étape de la méthodologie, à savoir la dilatation pas à pas du tissu bâti étudié, est décrite brièvement. L'accent est mis sur la deuxième étape, qui est celle de l'identification d'un seuil dans la courbe issue des dilatations. Le troisième chapitre de l'article est l'occasion de présenter quelques exemples d'application de la méthodologie à des cas théoriques, tandis que le quatrième et dernier chapitre s'intéresse à l'application pour la délimitation morphologique des agglomérations.

KEY WORDS

Built-up patterns
Urban areas
Limit
Fractal
Dilation
Curvature

ABSTRACT

Identification of morphological sets using a multi-scale analysis

The paper deals with the identification of the envelope of built-up patterns that we define as the limit of a morphologically coherent set through the scales. The point of view is purely morphological; it refers to a multi-scale approach. Besides the description of the context of the research (that is the urban-rural delimitation) the paper is dedicated to the presentation of the methodological principles which allow the identification of the envelope of built-up patterns. The first step of the methodology, that is the step by step dilation of a studied built-up pattern, is briefly described. The emphasis is placed on the second step of the methodology that is the identification of a threshold in the curve stemming from the dilations. The third part of the paper presents some examples of application to theoretical cases, whereas the fourth and last part deals with the application for the morphological delimitation of urban areas.

1. Introduction

La délimitation spatiale d'un phénomène, notamment la délimitation ville-campagne, est une des préoccupations constantes des géographes. L'objectif de cet article est de contribuer à ce champ de recherche en abordant cette question d'un point de vue morphologique. Nous nous basons sur l'analyse de tissus bâtis et cherchons à identifier l'enveloppe de sous-ensembles morphologiques caractérisés par une organisation spatiale multi-échelle spécifique. Pour ce faire, nous nous appuyons sur certains concepts de la géométrie fractale, qui permettent de relier la bordure d'un tissu bâti et son enveloppe (Longley et Batty, 1989). La principale hypothèse est ici que les tissus urbains répondent à une logique d'organisation fractale (Batty et Longley, 1986 ; Batty et Longley, 1994 ; Frankhauser, 1988 ; Frankhauser, 1994 ; Mandelbrot, 1982). Cette hypothèse implique l'existence d'une relation entre les formes observées localement, considérant un niveau d'analyse microscopique, et les formes urbaines globales, considérant le niveau d'analyse de l'ensemble d'une agglomération.

Lors d'une première étape de recherche, nous avons posé les bases théoriques d'une méthodologie permettant d'identifier l'enveloppe d'ensembles morphologiques cohérents. Nous avons montré qu'il était possible de détecter une rupture dans l'organisation multi-échelle d'un tissu bâti au moyen d'une procédure de dilatation (Frankhauser et Tannier, 2005). Dans cet article, nous proposons une méthode qui permet d'identifier un seuil significatif dans la courbe représentant l'évolution du nombre d'agrégats bâtis au fil des dilatations.

2. Contexte : la question de la délimitation ville-campagne

La question de la délimitation ville-campagne peut être abordée selon différentes approches. Nous les présentons ici brièvement, afin de préciser notre contribution à ce domaine de recherche. Ceci nous permettra également de situer notre approche relativement à la question sous-jacente de la réalité morphologique des agglomérations.

2.1. Introduction de critères morphologiques dans la classification d'unités spatiales élémentaires

L'identification d'une limite urbaine résulte très souvent d'une entreprise de classification ou de typologie d'entités spatiales élémentaires (unités statistiques ou cellules d'une grille). Les principales caractéristiques d'une telle approche sont d'une part, la sélection d'un ensemble de critères de classification soit, a priori soit, émergeant de l'analyse ; d'autre part, l'application des critères sélectionnés à un espace divisé en entités

spatiales élémentaires. Les classifications permettent d'identifier au moins deux types de zones, une zone urbaine et une zone rurale, mais souvent plusieurs.

Ce champ de recherche a donné lieu à un très grand nombre d'applications en télédétection et géomatique. Les chercheurs de ces domaines ont développé des méthodes sophistiquées pour créer des classifications d'occupation du sol urbain-rural (notamment dans les franges urbaines et périurbaines) et pour étudier les changements d'occupation du sol urbain-rural (voir par exemple (Donnay *et al.*, 2001 ; Treitz *et al.*, 1992). Afin d'améliorer ces classifications, deux voies intéressantes et complémentaires ont été explorées. L'une consiste en l'introduction de nouveaux critères de classification de nature morphologique. L'autre est de travailler sur les caractéristiques multi-échelles des tissus bâtis. L'étude menée par Bibby et Sheperd en 2004 illustre bien ces orientations. Ils ont en effet proposé une nouvelle classification des zones urbaines et rurales pour l'Angleterre et le Pays de Galles, basée sur l'identification de types de peuplement (Bibby et Shepherd, 2004). Sur la base d'une grille définissant des cellules de un hectare, ils ont identifié une série de types de peuplement correspondant chacun à un profil de densité. Un profil de densité combine une mesure de la densité résidentielle dans une cellule considérée et la mesure de la densité résidentielle dans les cellules voisines à différents intervalles de distance. Bibby et Sheperd ont développé un argumentaire pragmatique en faveur d'une approche multi-échelle, qui reflète les objectifs pratiques de leur travail : pour eux, prendre en compte les densités résidentielles dans l'environnement de chaque cellule est utile à l'aménagement car ceci donne une indication sur les coûts potentiels liés à la distance qu'il faudrait envisager pour répondre à la demande en services de cette cellule.

Ainsi, réaliser une classification qui tient compte à la fois de la forme des tissus bâtis et de leurs caractéristiques multi-échelles répond bien à la nécessité pratique d'une délimitation urbain-rural. Cependant, ceci ne permet pas de répondre à la question de la réalité morphologique des agglomérations. Comme l'a notamment exprimé Webster, une classification n'est pas en soi porteuse de sens : elle le devient quand les critères de classification sont mis en relation avec des éléments de théorie sur le fonctionnement urbain (Webster, 1995).

Le cas des découpages administratifs et des zonages est particulier car leur définition tient compte de considérations pratiques (lois et règlements d'urbanisme, orientations d'aménagement...). L'analyse de ces découpages répond à deux objectifs :

- déterminer à quel point les considérations pratiques influencent la définition de la ville implicite à chaque découpage (Le Gléau *et al.*, 1997) ;
- déterminer la pertinence de différents découpages en fonction du type d'analyse envisagé (Guérois et Paulus, 2002).

Mais derrière ces objectifs se profile aussi la question de la réalité morphologique des agglomérations. En effet, si un découpage ou un zonage répond à des considérations pratiques données, la justification de celui-ci va au-delà. Ainsi, la question de la pertinence d'un découpage au regard d'une réalité morphologique pose la question de la réalité morphologique de la ville elle-même.

Au final, les classifications sont utiles, tant en vue d'analyses statistiques que pour la gestion et l'administration des espaces considérés. Il est intéressant d'introduire des critères de classification de nature morphologique, dans le but de distinguer efficacement les formes bâties urbaines des formes rurales. Cependant, ceci n'éclaire pas la question de la réalité morphologique des agglomérations.

2.2. Analyse morphologique sans découpage spatial a priori

Pour étudier les caractéristiques morphologiques d'un tissu bâti, il est possible de travailler sans discrétiser a priori l'espace étudié. L'identification d'une délimitation morphologique ville-campagne consiste alors à rechercher des variations dans la forme du tissu bâti, qui puissent correspondre à des différences d'occupation de l'espace urbain-rural. Une telle approche suppose de travailler sur de grandes zones incluant des formes pouvant être tant urbaines que rurales.

Une possibilité : considérer des seuils de distance définis a priori

Dans l'optique d'une délimitation ville-campagne, il est communément admis d'utiliser des seuils de distance fixés a priori. Ces seuils de distance déterminent le niveau de contiguïté en-deçà duquel on considère les éléments comme appartenant au même ensemble morphologique. De tels seuils sont souvent appliqués suite à une entreprise de classification : la classification sert à sélectionner les éléments qui se ressemblent, puis les éléments semblables suffisamment proches sont regroupés ensemble (Donnay et Lambinon, 1997; Weber, 2001; Weber *et al.*, 1997). Ceci correspond à une opération de régionalisation (De Ruffray, 2007).

Un seuil de distance peut également être appliqué indépendamment de toute classification. Ainsi, pour délimiter une agglomération, Bailly (1996) a proposé de transformer une image binaire du bâti au moyen d'une série de traitements de morphologie mathématique, puis de regrouper ensemble les éléments transformés éloignés de moins de 200 m. Suivant une logique comparable, M. Guérois a identifié l'enveloppe de 40 agglomérations européennes en utilisant une procédure d'érosion-dilatation via un logiciel SIG (Guérois, 2003). M. Guérois n'a pas développé d'argumentaire spécifique pour justifier des seuils de distance qu'elle a utilisés. Elle a toutefois observé que, dans la plupart des cas, une variation de la largeur du buffer de dilatation de 250 à

400 m n'avait que peu de conséquences sur la forme globale de l'enveloppe urbaine générée.

En effet, dans le cas de zones densément bâties, les distances qui séparent les bâtiments voisins varient relativement peu. En revanche, dans les franges urbaines, les formes bâties sont beaucoup plus irrégulières. Les caractéristiques morphologiques des espaces périurbains varient considérablement : des formes d'urbanisation diffuses (mitage, maisons anciennes isolées) côtoient des formes nettement plus compactes (lotissements de maisons mitoyennes) (Caruso, 2001). En conséquence, les distances qui séparent des bâtiments voisins sont extrêmement variables et il est aussi difficile de trouver une seule et unique définition d'une forme bâtie rurale que d'une forme bâtie urbaine. De ce fait, nous avons choisi d'éviter l'introduction de seuils de distance définis a priori.

Une autre possibilité : identifier des seuils de distance a posteriori

L'idée d'une réalité morphologique des agglomérations recouvre implicitement une idée de continuité du tissu bâti. La définition a priori d'un seuil de distance maximum entre bâtiments permet d'identifier une discontinuité bâtie d'un point de vue mono-échelle. Notre approche ne remet pas ceci en cause, mais examine la continuité du bâti d'un point de vue multi-échelle : l'identification d'une discontinuité émerge d'une transformation du tissu bâti lui-même et la recherche d'un seuil de distance marquant cette discontinuité intervient dans un deuxième temps. Ce faisant, le seuil de distance est un résultat et non un outil méthodologique. Il est relatif, et non absolu, et nous ne présumons pas l'existence d'une limite urbain-rural. Une telle limite existe si deux systèmes de peuplement distincts peuvent être distingués d'un point de vue fractal. En revanche, dans le cas d'un continuum urbain-rural, il est impossible d'identifier une discontinuité morphologique au sein de l'espace étudié.

3. Principes méthodologiques : recherche d'un seuil principal dans la courbe issue de la dilatation du bâti

Pour identifier l'enveloppe morphologique d'un sous-ensemble bâti, nous proposons de procéder en deux étapes. La première consiste en une dilatation pas à pas du tissu bâti considéré. Le nombre d'agrégats bâtis à chaque étape de dilatation est compté et les résultats sont représentés sous la forme d'un graphique. Le deuxième volet de la procédure a pour but l'identification d'un seuil dans la courbe obtenue, qui correspond à un changement majeur dans son comportement, et la représentation cartographique de l'emprise spatiale du seuil identifié.

Pratiquement, nous travaillons à partir d'images raster binaires de tissus bâtis, dans lesquelles chaque pixel occupé représente soit, un bâtiment soit, une portion de bâtiment. Par définition, les pixels considérés sont donc

petits (moins de 5 m de côté). Les contours des éléments bâtis composent la bordure de l'image étudiée.

3.1. Dilatation pas à pas du tissu bâti

Le principe de la dilatation consiste à entourer chaque élément bâti de l'image d'une bande noire dont l'épaisseur augmente de manière itérative (Minkowski, 1903). Au fur et à mesure des dilatations, des éléments bâtis initialement séparés fusionnent et forment des agrégats ; ces agrégats grossissent d'étape en étape et leur nombre diminue. Les dilatations s'arrêtent quand tous les éléments de l'image forment un seul et unique agrégat. Le nombre d'agrégats bâtis à chaque étape de dilatation est compté et les résultats sont représentés sous la forme d'un graphique.

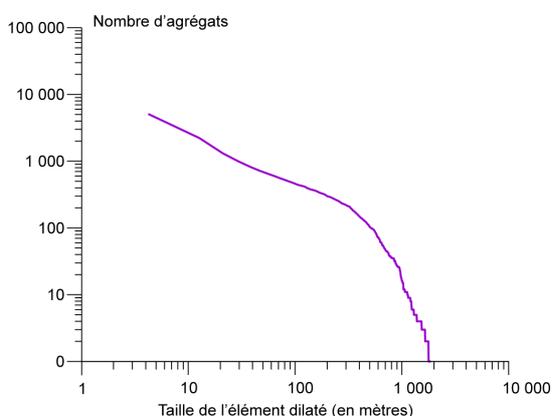


Figure 1. Un exemple de courbe résultant du comptage du nombre d'agrégats bâtis au fil des dilatations

Comme le nombre d'agrégats lors des premières étapes de dilatations est beaucoup plus élevé que le nombre d'agrégats lors des dernières étapes, il est nécessaire, pour des raisons de lisibilité, d'adopter une représentation graphique bi-logarithmique (figure 1). On verra aussi par la suite qu'une telle représentation est bien adaptée aux objectifs recherchés car elle permet de représenter une fonction puissance sous une forme linéaire.

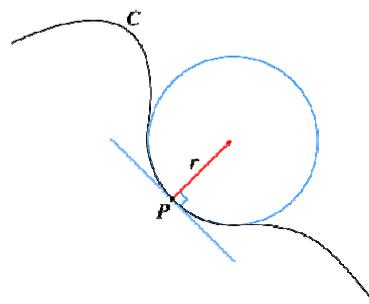
Sur le plan pratique, la dilatation pas-à-pas et la construction de la courbe des agrégats sont réalisées grâce à la fonction « analyse des agrégats » (*cluster analysis*) existant dans le logiciel Fractalyse (Vuidel *et al.*, 2006).

3.2. Identification d'un seuil dans la courbe issue des dilatations

Dans le cas d'un tissu bâti organisé de manière purement multi-échelle (*i.e.* fractale) et suivant une seule logique de répartition des éléments dans l'espace (*i.e.* mono-fractale), le nombre d'agrégats bâtis décroît

de manière linéaire au fil des dilatations, dans la représentation double logarithmique. Dès lors, la courbe des agrégats ne présente aucun seuil significatif, cette absence de seuil signifiant l'impossibilité d'identifier l'enveloppe morphologique d'un ensemble d'éléments de l'image qui ne soit pas celle de l'image entière. Rechercher un seuil dans la courbe des agrégats consiste à mettre en évidence l'existence d'une rupture dans l'organisation multi-échelle d'un tissu bâti, qui est interprétée en terme de coexistence de deux logiques différentes dans l'organisation spatiale des éléments de l'image. Les éléments éloignés les uns des autres d'une distance inférieure ou égale à celle correspondant au seuil de dilatation font partie d'un même ensemble morphologique cohérent à travers les échelles. Une telle approche évite l'introduction de seuils fixés a priori : les délimitations émergent d'une transformation itérative du tissu bâti lui-même et les seuils identifiés, s'il en existe, sont propres à chaque tissu bâti analysé.

Sur le plan pratique, nous supposons que le seuil significatif sur la courbe des agrégats correspond au point ayant la courbure maximale. Cette méthode de la courbure est beaucoup utilisée en imagerie, où elle sert à identifier les points marquants d'un contour, en vue de la segmentation d'une courbe fermée (Lowe, 1989). Elle possède l'avantage de ne pas introduire a priori sur la forme de la courbe étudiée. La courbure est définie comme l'inverse du rayon du cercle venant épouser la courbe au voisinage immédiat d'un point. Ce cercle est également appelé « cercle osculateur » (figure 2).



Source: http://fr.wikipedia.org/wiki/Cercle_osculateur

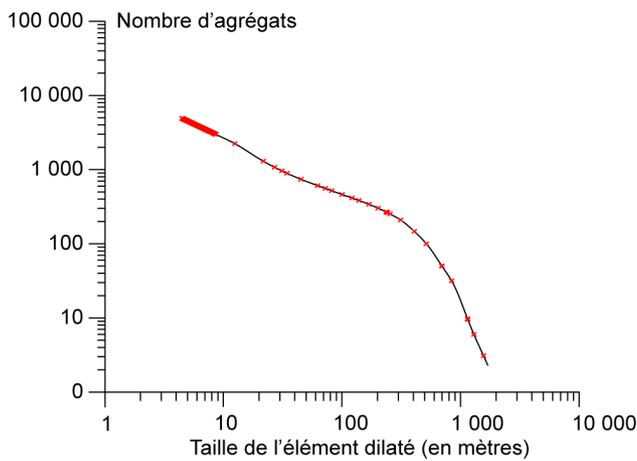
Figure 2. Cercle osculateur d'une courbe C en un point P

La courbure en un point détermine la propension de la courbe à former un virage plus ou moins serré. Dans notre cas, le seuil recherché est le point pour lequel le virage est le plus serré, soit le rayon du cercle osculateur le plus petit.

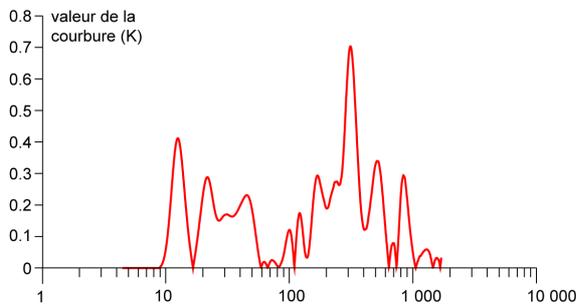
La courbure K en un point peut se calculer de la manière suivante :

$$K = \left| \frac{y''}{(1 + y'^2)^{3/2}} \right|$$

y' correspond à la vitesse de décroissance du nombre d'agrégats au fil des dilatations et y'' à son accélération. A la lecture de cette formule, on remarque que la courbure correspond globalement au rapport entre l'accélération et la vitesse. Au point de courbure maximale, l'écart entre la vitesse de décroissance du nombre d'agrégats bâtis au fil des dilatations et son accélération est maximale. Si la courbe est linéaire, cette vitesse est constante et son accélération est nulle. Ainsi, rechercher le point de courbure maximale revient à identifier le seuil marquant une déviation maximale de la courbe au regard d'une décroissance linéaire du nombre d'agrégats bâtis au fil des dilatations.



a. une courbe de dilatation



b. fonction courbure correspondante

Figure 3. Exemple de fonction courbure

La figure 3a présente un exemple de courbe de dilatation et figure 3b montre la fonction courbure correspondante. Chaque point de courbure correspond à un sommet de la fonction courbure. Deux remarques peuvent être faites : d'une part, les points de courbure maximale sont très nombreux ; d'autre part, il semble qu'il y ait davantage de points de courbure que de sommets sur la fonction courbure, notamment en début de courbe. En fait, ces points supplémentaires correspondent à des micro-variations de la courbe, qui se transcrivent sous la forme de micro-sommets de la fonction courbure, invisibles sur la figure 3b. On

remarque également qu'un sommet de la fonction courbure est nettement plus important que les autres. Cependant, à cette étape de la démarche, il n'est pas évident que ce sommet le plus important corresponde au point de courbure principale. En effet, la courbure est une mesure purement locale. Le sommet le plus haut correspond à une courbure locale importante, mais nous recherchons une information globale, à savoir le point où la courbe dans son ensemble présente une courbure principale.

De manière à éliminer ces variations locales qui représentent des points de courbure importants localement, mais qui ne reflètent pas forcément la tendance générale de la courbe, il est nécessaire de lisser la courbe. Nous avons ici choisi d'adopter une procédure de lissage gaussien pas à pas, qui se définit de la manière suivante.

La courbe c est définie par ses coordonnées en x et en y :

$$c(t) : [x(t), y(t)]$$

La fonction gaussienne de variance sigma est définie comme suit :

$$G_{\sigma}(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{t^2}{2\sigma^2}\right)$$

Les coordonnées sont convoluées par la gaussienne :

$$X(t) = G_{\sigma}(t) \otimes x(t)$$

$$Y(t) = G_{\sigma}(t) \otimes y(t)$$

Enfin, la courbe convoluée C est définie par les fonctions $X(t)$ et $Y(t)$:

$$C(t) : (X(t), Y(t))$$

La courbe originale est lissée pour des variances croissantes, jusqu'à ne comporter plus qu'un seul point de courbure maximale (figure 4). Il est alors possible de parler de courbure principale. Ainsi, sur la figure 5, on voit nettement se dégager une courbure maximale pour une variance de 0,2 (la variance est exprimée en % de courbe), qui correspond au seuil marquant un changement majeur de comportement de la courbe issue des dilatations.

Nous terminerons la présentation des principes méthodologiques par quelques précisions :

- en raison de la représentation bi-logarithmique des résultats, les premiers points de la courbe sont plus espacés sur l'axe des abscisses que les derniers (l'abscisse est graduée de manière non linéaire), d'où un lissage plus important au niveau des premiers points de la courbe. Pour éviter ceci, nous avons choisi d'interpoler la courbe avant de faire le lissage, ce qui permet d'obtenir une graduation linéaire en abscisse. Dans notre cas, il est possible d'appliquer une interpolation linéaire simple. En effet, nous travaillons sur des courbes monotones décroissantes. De plus, l'important pour nous est la forme de la courbe qui, en théorie, reflète un processus continu : nous ne sommes

pas dans une logique de type statistique où le nombre d'individus (*i.e.* de points sur la courbe) compte, ce qui nous autorise à interpoler la courbe même si cette transformation change le nombre de points qui la composent.

– la recherche de la courbure principale n'est pas une procédure totalement automatique. En effet, grâce au lissage, on peut identifier le point de courbure principale. Cependant, comme le lissage décale ce point

(en raison de la transformation de la courbe), il est ensuite plus intéressant de localiser le seuil sur une courbe moins lissée.

– en pratique, pour effectuer les opérations de lissage, de calcul de la fonction courbure et d'identification des points de courbure, nous avons développé un petit programme sous Octave, qui est un logiciel libre de calcul numérique.

(<http://www.octave.org>).

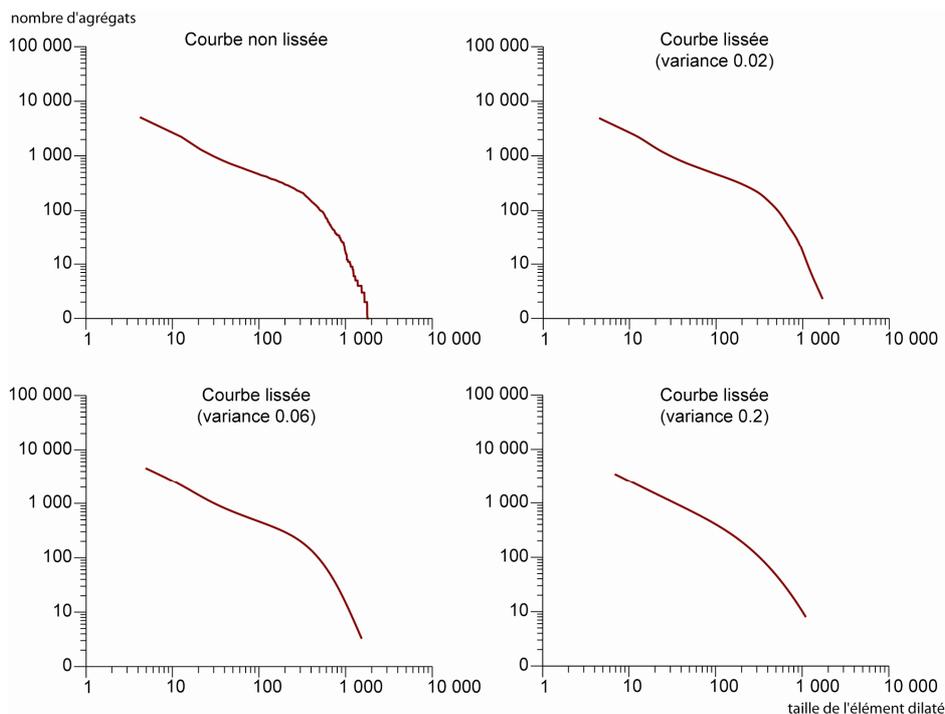


Figure 4. Une courbe originale et ses trois étapes de lissage

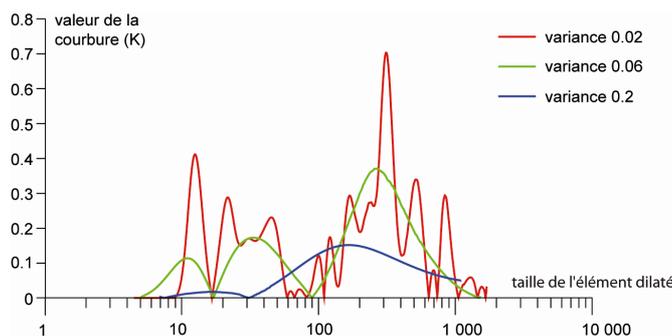


Figure 5. Fonctions courbure correspondant aux trois courbes lissées présentées en figure 4

4. Application à des cas théoriques

4.1 Identification de l'enveloppe morphologique d'une forme fractale régulière

Pour commencer, intéressons-nous à la dilatation d'une forme fractale régulière générée selon un strict principe

itératif. L'exemple étudié est celui du tapis de Sierpinski hybride. Il combine un tapis de Sierpinski, qui consiste en un seul et unique agrégat à chaque étape d'itération, et une poussière de Fournier, composée d'éléments non connexes à chaque étape d'itération. De par ces caractéristiques morphologiques, le tapis hybride est proche des tissus urbains réels. La forme fractale régulière présentée en figure 6 peut donc être considérée comme

une ville théorique, dont chaque élément représente un bâtiment, celle-ci en comprenant 28 500 au total.

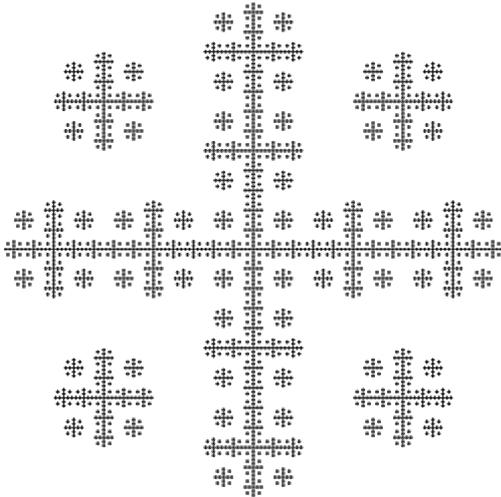


Figure 6. Un tapis de Sierpinski hybride en guise de ville fractale théorique

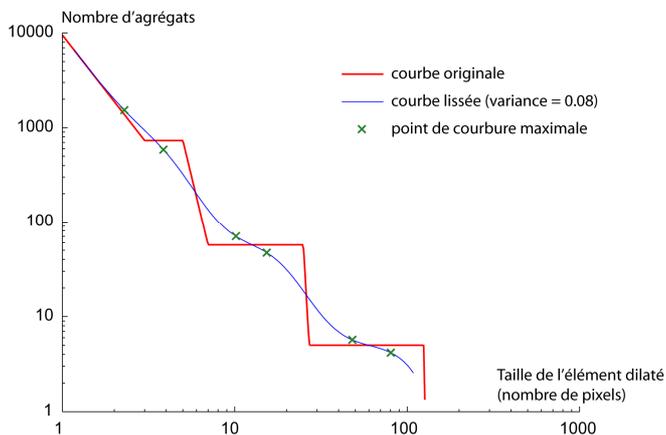


Figure 7. Courbe issue des dilations du tapis de Sierpinski hybride

Si on cherche à interpréter la forme de la courbe obtenue à l'issue des dilations dans l'optique de l'identification d'un seuil, on voit que même si la courbe présente des paliers, elle est de nature linéaire : à une certaine progression sur l'axe des abscisses correspond la même progression sur l'axe des ordonnées (figure 7). En effet, en raison de la représentation double-logarithmique, la progression géométrique (donc multiplicative)¹ du nombre d'agrégats au fil des dilations est transformée en une progression linéaire. Ce faisant, aucun seuil ne peut être identifié. L'enveloppe de la ville théorique émerge quand le nombre d'agrégat tombe à 1 et l'ensemble

¹ Une loi fractale est une loi de puissance qui correspond à une progression géométrique (donc multiplicative) du nombre d'éléments en fonction de la taille des éléments (ou de la distance entre ces éléments). La pente de la courbe représentant cette loi de puissance correspond à la dimension fractale D qui, pour une fractale simple régulière, est constante quelle que soit l'échelle considérée.

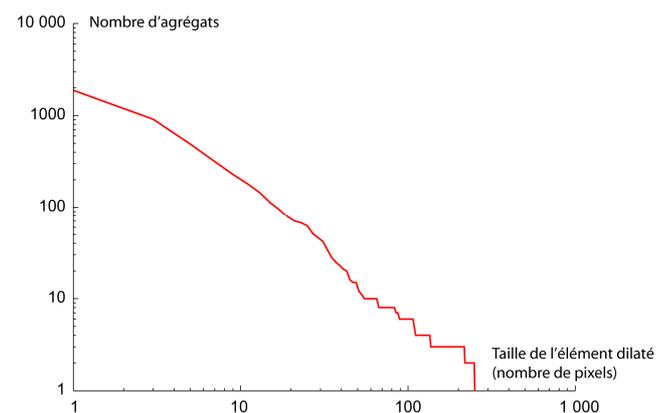
morphologiquement cohérent qui est alors identifié correspond à la forme initiale dans sa totalité.

4.2 Identification de l'enveloppe morphologique d'une fractale aléatoire

La figure 8 présente une fractale aléatoire et la courbe des agrégats issue des dilations qui lui correspond. Du fait du caractère aléatoire du tissu étudié, les paliers identifiables sur la figure précédente n'apparaissent plus aussi nettement, mais le caractère linéaire de la courbe demeure.



a. Un exemple de ville fractale aléatoire



b. courbe issue des dilations correspondantes

Figure 8. Ville fractale aléatoire et courbe de dilataion

4.3 Identification de l'enveloppe morphologique d'une forme fractale dans un environnement non fractal

Étudions maintenant un tissu bâti dans lequel coexistent deux logiques différentes dans l'organisation spatiale des éléments. Nous prenons comme exemple un tapis de Sierpinski hybride dans un environnement non fractal (figure 9). Cette image est en quelque sorte la métaphore d'une ville située dans un environnement rural. A travers l'analyse du nombre d'agrégats au cours des dilations, on retrouve la présence de paliers identifiés pour la ville fractale isolée, mais, au centre de la courbe, on identifie maintenant une rupture dans le

comportement de celle-ci : un seuil principal peut être identifié au niveau de la troisième étape de dilatation, qui correspond à une taille de l'élément dilaté égale à 10 pixels. Sur la figure 9, nous avons également représenté l'enveloppe morphologique de l'agrégat central. Celui-ci recouvre tous les éléments connectés au point central du tapis hybride à la troisième étape de dilatation. Il est intéressant de noter que cet agrégat central ne contient quasiment aucun point de l'environnement.

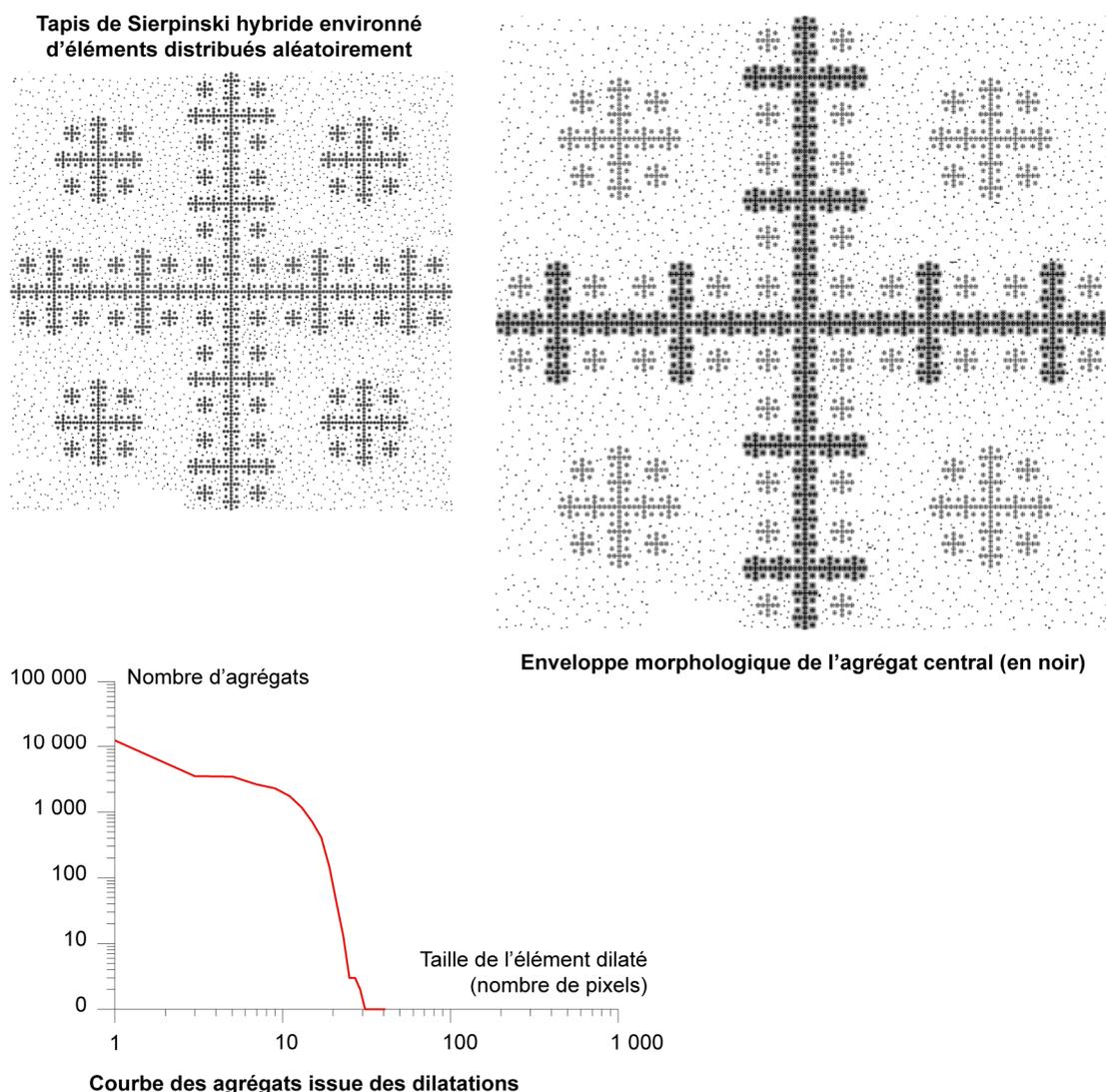


Figure 9. Un exemple de ville fractale théorique dans un environnement non fractal

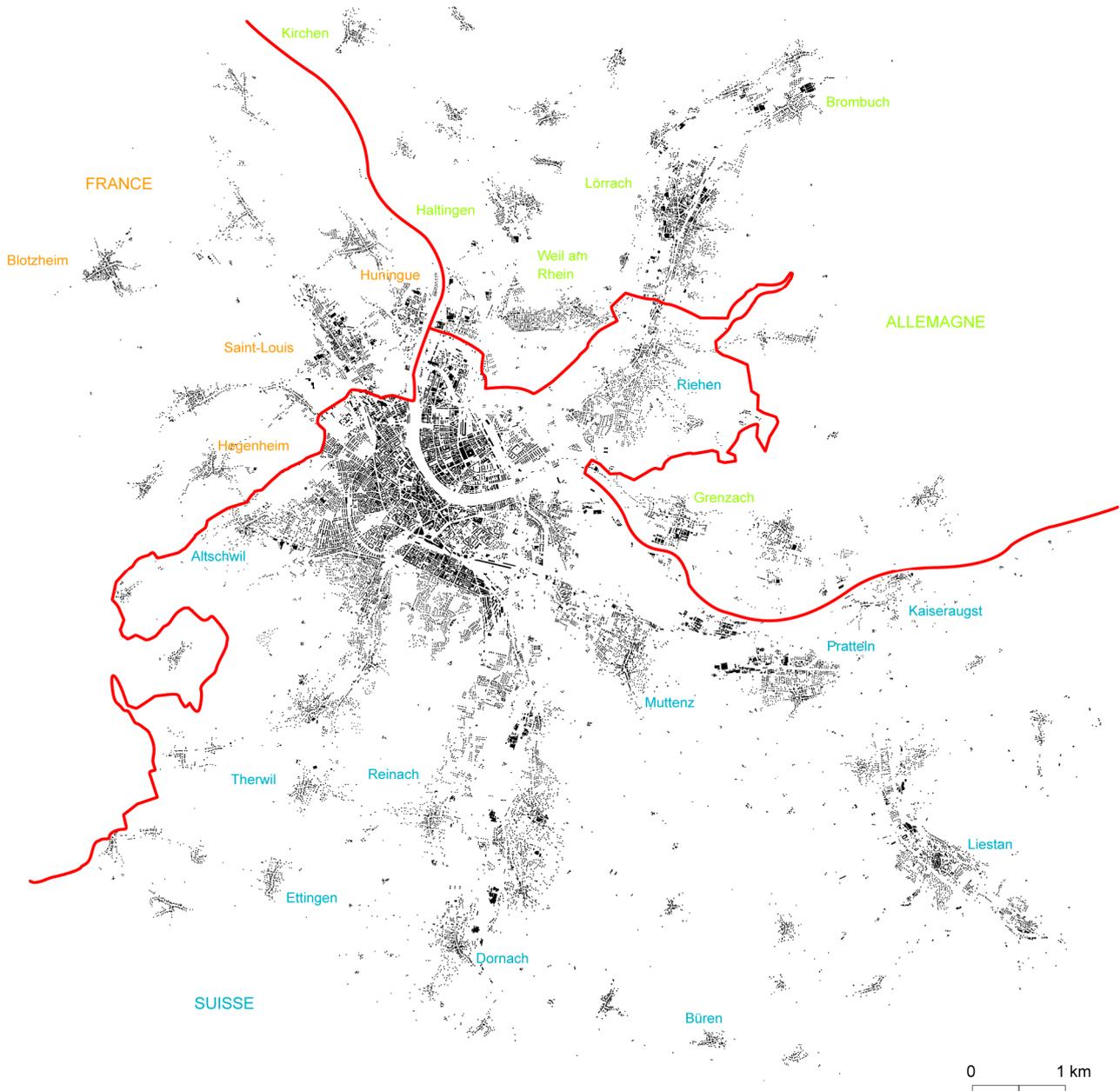
5. Application pour la délimitation morphologique des agglomérations

Nous avons choisi d'étudier cinq agglomérations qui sont Besançon, Stuttgart, et Bâle en 1882, 1957 et 1994. Chacune de ces zones comprennent un ou plusieurs centres urbains et les espaces périurbains environnants.

Nous travaillons à partir d'images raster binaires du tissu bâti de ces agglomérations, dans lesquelles chaque cellule bâtie représente une portion de bâtiment. Pour les images de Bâle et de Besançon, la taille du pixel est de 4 m ; pour l'image de Stuttgart, elle est de 3,15 m. En guise d'exemple, la figure 10 présente le tissu bâti de l'agglomération de Bâle en 1957. La comparaison des résultats obtenus pour ces cinq images ayant des résolutions différentes n'est pas a priori évidente. D'une part, le nombre d'étapes de dilatation varie en fonction de la taille initiale de la cellule. D'autre part, un léger

décalage dans la mesure de la distance entre deux cellules peut se produire si les cellules n'ont pas la même taille. Cependant, ces petites variations d'une image à une autre sont négligeables. Le point important de l'analyse est que la forme du tissu bâti obtenu par dilatation est la même quelle que soit la taille initiale de la cellule. L'unique condition pour comparer les résultats obtenus pour des images différentes est que seule la taille de la cellule varie, mais non la nature de celle-ci. Ainsi, il est possible de comparer les résultats obtenus pour une taille initiale de cellule égale à 5 m ou à 10 m, mais cette comparaison n'a de sens que si dans

les deux cas la cellule représente une portion de bâtiment ou un bâtiment entier. Si on considère par exemple une image Corine Land Cover, une cellule bâtie (*built-up area*) ne représente ni une portion de bâtiment, ni un bâtiment dans son ensemble : elle représente une portion d'espace artificialisée. Il n'est donc pas possible de comparer une courbe des agrégats issue de la dilatation d'une image Corine avec une même courbe obtenue pour image issue d'une numérisation de la couche bâtie de la BD TOPO de l'IGN.



Source : Bundesamt für Landestopographie, 3084 Wabern

Tiré de Reitel B., Tannier C., 2003, Chapitre 2.3.2 : Bâle, in Frankhauser P. (dir.), Morphologie des villes émergentes en Europe à travers les analyses fractales, Rapport de recherche pour le Ministère de l'Équipement, 90-110.

Figure 10. Tissu bâti de l'agglomération de Bâle en 1957

À l'échelle d'une agglomération, l'enveloppe est une ligne virtuelle continue, qui contient une (ou plusieurs) ville(s) centre(s) et les espaces périurbains qui les entourent et avec lesquelles ils forment un ensemble morphologique cohérent à travers les échelles.

5.1. Analyse des courbes obtenues à partir de la dilatation pas à pas des cinq tissus bâtis

Les courbes de Bâle en 1882 et de Besançon sont assez similaires (figure 11). Deux segments de courbe peuvent être identifiés. Le premier correspond à une décroissance modérée du nombre d'agrégats bâtis au fil des dilatations tandis que le second est marqué par une forte décroissance du nombre des agrégats. De fait, les tissus urbains de Bâle en 1882 et de Besançon présentent tous deux un centre urbain aux limites relativement nettes, entouré d'agrégats bâtis assez éloignés les uns des autres. Une telle configuration rappelle celle de la ville fractale dans un environnement non fractal. L'identification aisée des deux segments de courbe signe l'existence de deux systèmes de peuplement distincts. Le seuil, qui correspond au changement majeur dans le comportement de la courbe, correspond à la limite spatiale entre ces deux systèmes de peuplement.

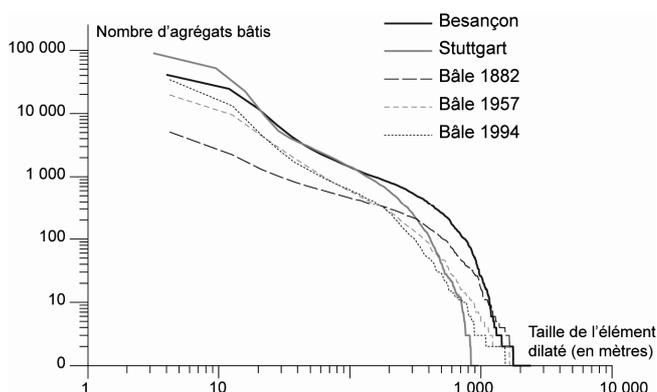


Figure 11. Courbes des agrégats issues des dilatations pour les cinq agglomérations étudiées

Les tissus urbains de Bâle en 1957 et en 1994 et de Stuttgart présentent une organisation spatiale très différente, qui se traduit par une décroissance rapide du nombre d'agrégats bâtis au fil des dilatations et l'identification d'un seuil plus difficile que dans les deux premiers cas. Ceci est caractéristique d'une organisation spatiale très hiérarchisée : ces trois agglomérations sont plus proches d'une stricte hiérarchie fractale que les deux premières, la stricte hiérarchie fractale étant caractérisée par l'absence de seuil.

5.2 Comparaison des seuils déterminés à partir de l'identification du point de courbure principale

Les éléments éloignés les uns des autres d'une distance inférieure ou égale à celle correspondant au seuil de dilatation font partie d'un même ensemble morphologique cohérent à travers les échelles. Le seuil de distance définissant l'agglomération morphologique est équivalent à la taille de l'élément dilaté pour l'étape de dilatation correspondant au point de courbure principale.

Agglomération	Seuil de distance définissant l'agglomération morphologique (m)
Besançon	260
Stuttgart	150
Bâle 1882	258
Bâle 1957	199
Bâle 1994	140

Tableau 1. Seuils de distance définissant l'agglomération morphologique pour les cinq cas étudiés

Les seuils identifiés diffèrent selon les agglomérations (tableau 1) : l'application d'un même seuil de distance pour définir une agglomération morphologique n'est donc pas en cohérence avec la réalité morphologique des agglomérations. En guise d'exemple, nous avons choisi de représenter les enveloppes morphologiques de l'agglomération de Bâle aux trois dates cartographiées à partir des seuils de distance présentés dans le tableau 1 (figures 12 à 14 – l'agglomération morphologique est représentée en grisé).

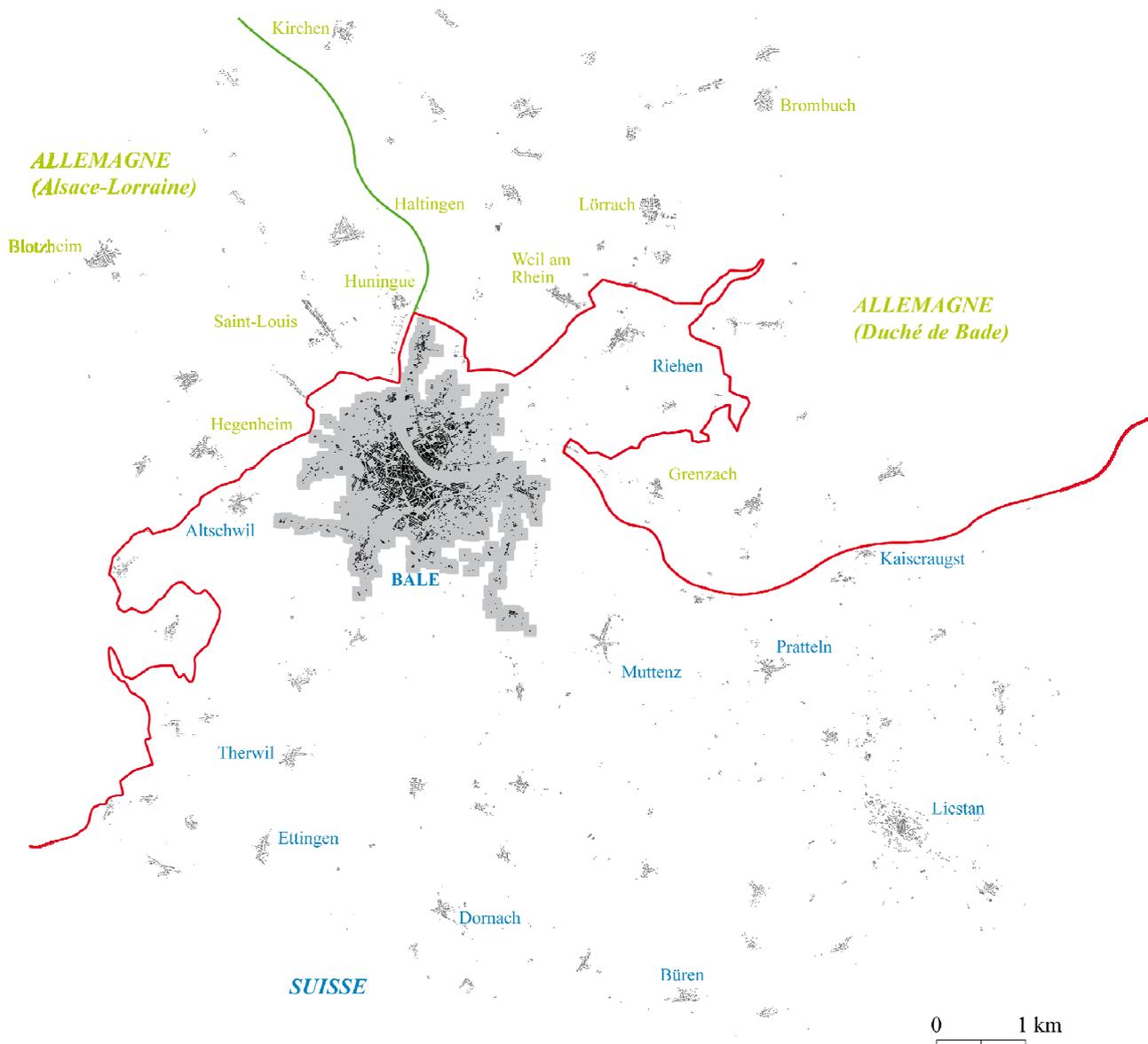
L'analyse diachronique de l'agglomération de Bâle montre que le seuil de distance diminue au cours du temps ; conjointement, la forme de l'enveloppe évolue. Dans les grandes lignes, l'agglomération morphologique s'étend. Uniquement située en Suisse en 1882, elle devient trinationale durant la première moitié du XX^{ème} siècle. Le développement du tramway à partir de 1895 peut expliquer cette évolution. En effet, le réseau de tramway dessert les parties alsaciennes et badoises de l'agglomération dès le début du XX^{ème} siècle (Reitel et Tannier, 2003). Entre 1882 et 1957, on observe par ailleurs une forte expansion de l'agglomération morphologique, surtout en Suisse. Ceci correspond à une période de croissance importante de la population urbaine dans les années 1950-60, touchant essentiellement la partie suisse de l'agglomération (Reitel et Tannier, 2003). Dans les trois pays, une auréole de villages se maintient autour de l'agglomération morphologique.

Entre 1957 et 1994, l'agglomération morphologique évolue moins (les principaux traits de la forme urbaine sont conservés), mais les variations constatées n'en demeurent pas moins intéressantes. La tendance dominante est celle d'une expansion de l'agglomération

morphologique en France et d'une contraction de celle-ci en Suisse et en Allemagne. Ainsi, la partie française connaît une fermeture de lacunes existant dans le tissu bâti en 1957 (vers Hegenheim et Huningue). Au contraire, les parties suisses et allemandes voient des lacunes s'ouvrir dans la limite de l'agglomération morphologique entre 1957 et 1994 (par exemple, entre Therwil et Reinach, à l'Est de Reinach, ou encore au Sud de Weil am Rhein). Dans le même temps, des portions de territoire rattachées à l'agglomération morphologique en 1957 ne le sont plus en 1994. Ceci est le cas au Sud-Est de Dornach et pour la commune du Pratteln. Entre cette commune du Pratteln et celle de

Grenzach, la forme de l'agglomération morphologique connaît en outre d'importantes modifications (expansion à certains endroits, contraction et création de lacunes à d'autres endroits). Par ailleurs, l'auréole de villages périurbains se maintient toujours en 1994.

Ainsi, l'identification de l'enveloppe morphologique de l'agglomération de Bâle permet de mettre évidence des évolutions intéressantes et impossibles à détecter sans cela. Maintenant, ces résultats devraient être confrontés aux évolutions fonctionnelles de l'agglomération qui ont eu lieu de part et d'autre des frontières : mutations socio-économiques et changements dans la politique d'aménagement urbain.



Source pour la carte du bâti : Bundesamt für Landestopographie, Wabern, Allemagne

Figure 12. Délimitation morphologique de l'agglomération de Bâle en 1882

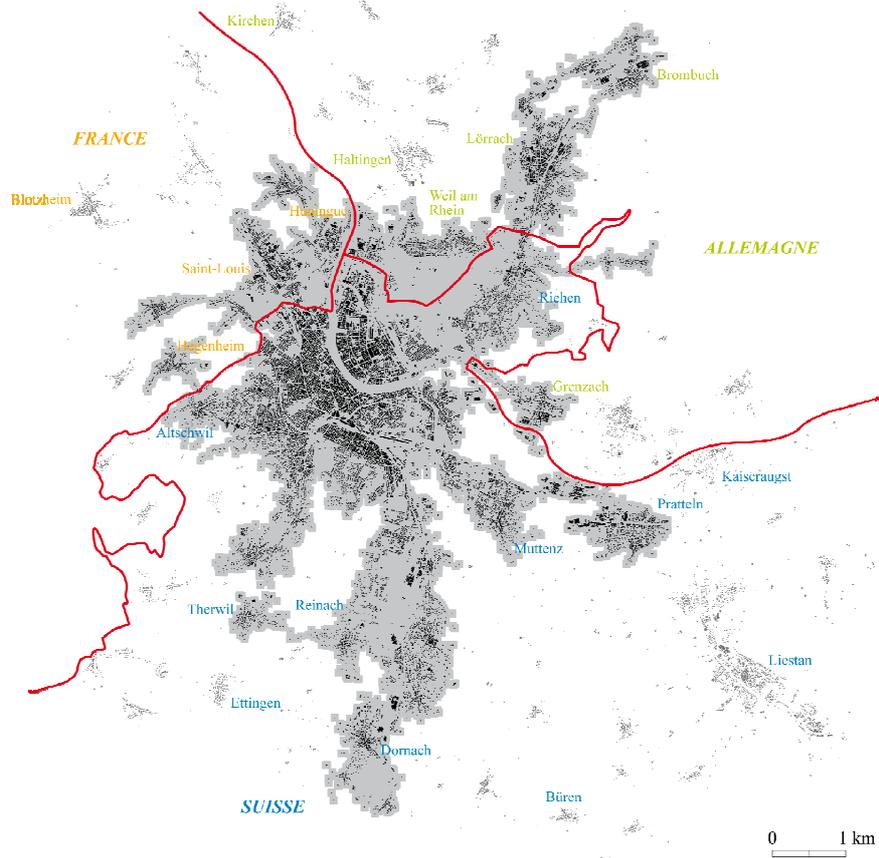


Figure 13. Délimitation morphologique de l'agglomération de Bâle en 1957

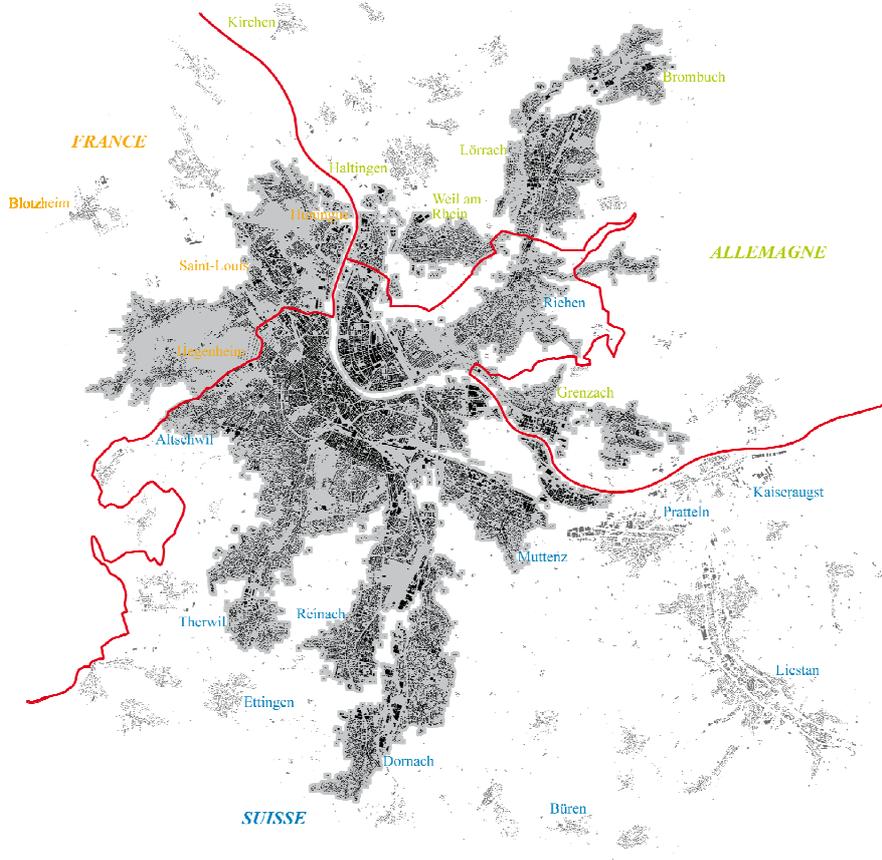


Figure 14. Délimitation morphologique de l'agglomération de Bâle en 1994

6. Conclusion

Cet article a permis d'asseoir l'idée que la génération de l'enveloppe d'ensembles morphologiques cohérents à travers les échelles est possible et a du sens. Ainsi, l'approche traditionnelle, qui consiste à définir un seuil de distance à partir duquel des bâtiments appartiennent à un même ensemble morphologique, est abandonnée au profit d'une définition multi-échelle de la connectivité morphologique. Des seuils de distance peuvent être identifiés, mais ils sont propres à chaque tissu bâti. Ce faisant, cet article représente une nouvelle contribution en matière d'utilisation des métriques spatiales pour l'analyse des espaces urbains, que préconisent par exemple Alberti et Waddell (2000), Parker et Meretsky (2004) ou encore Herold *et al.* (2005).

La méthodologie proposée peut être appliquée à n'importe quelle agglomération, quelle que soit sa taille et son organisation spatiale (monocentrique ou polycentrique, dense ou peu dense...). Bien sûr, considérant une seule et unique agglomération, le seuil de distance identifié peut varier selon la taille de la zone étudiée. De telles variations sont intéressantes à mettre en évidence car elles permettent de caractériser différentes facettes de l'organisation spatiale du tissu bâti considéré. Ceci rejoint l'idée de S. Openshaw (1978) affirmant que le MAUP (*Modifiable Areal Unit Problem*) n'est en fait pas un problème devant être résolu au moyen de méthodes sophistiquées, mais un outil d'analyse potentiellement utile.

La génération de l'enveloppe de tissus bâtis peut être appliquée à l'échelle de l'ensemble d'une agglomération

comme à des échelles plus fines. Outre l'identification d'une limite ville-campagne, elle peut servir à mieux comprendre et caractériser la nature du contact entre espaces bâtis et non bâtis (tels que les espaces verts et naturels). Il importe ici de préciser que la recherche de la courbure principale dans la courbe issue des dilatations n'est pas la seule méthode possible pour identifier la distance à laquelle émerge une enveloppe morphologique, mais nous avons choisi cette méthode car elle permet d'identifier un seuil qui a un sens au regard de nos connaissances concernant l'organisation spatiale des tissus urbains. Quelques améliorations peuvent être envisagées sur le plan méthodologique. Notamment, il serait possible de remplacer l'étape de lissage gaussien pas à pas de la courbe par l'ajustement d'une fonction qui reste à déterminer (fonction polynomiale...). Le choix d'une telle fonction ne pourra se faire que suite à l'étude comparée de la forme des courbes obtenues pour un assez grand nombre d'agglomérations.

Remerciements

Les données de Besançon ont été mises à disposition par l'agence d'urbanisme de l'agglomération de Besançon (AUDAB), dans le cadre d'une convention pour un programme PREDIT intitulé « Vers des déplacements périurbains plus durables – Proposition de modèles fractals opérationnels d'urbanisation ». Les données de Stuttgart sont issues du SIG Landesvermessungsamt (Baden-Württemberg, Germany) et celles de Bâle proviennent de Bundesamt für Landestopographie, (3084 Wabern, Germany). Les cartes topographiques ont été digitalisées par l'UMR 7011 « Image et Ville » (CNRS/Université Louis Pasteur, Strasbourg, France).

7. Références bibliographiques

- Alberti M., Waddell P., 2000, An integrated urban development and ecological simulation model, *Integrated Assessment*, 1(3), 215–227.
- Bailly E., 1996, Position de recherche sur une méthode de détermination d'un contour urbain, *Cybergeo: European Journal of Geography*, 10.
- Batty M., Longley P., 1986, The fractal simulation of urban structure, *Environment and Planning A*, 18, 1143-1179.
- Batty M., Longley P. A., 1994, *Fractal cities: a geometry of form and function*, Academic Press, London.
- Bibby P., Shepherd J., 2004, Developing a new classification of urban and rural areas for policy purposes: the methodology. The Countryside Agency - Department for Environment, Food and Rural Affairs - Office of the Deputy Prime Minister - Office for National Statistics - Welsh Assembly Government. URL: <http://www.defra.gov.uk/rural/ruralstats/rural-definition.htm>
- Caruso G., 2001, Peri-urbanisation: the situation in Europe - A bibliographical note and survey of studies in the Netherlands, Belgium, Great Britain, Germany, Italy and the Nordic Countries, Report for the DATAR, Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement, France.
- De Ruffray S., 2007, L'imprécision et l'incertitude en géographie - l'apport de la logique floue aux problématiques de régionalisation, Mémoire d'habilitation à diriger des recherches, Vol. 1, Université Paris-Diderot Paris VII.
- Donnay J., Barnsley M., Longley P. (eds.), 2001, *Remote sensing and urban analysis*, Taylor and Francis, London.
- Donnay J., Lambinon M., 1997, Détermination des limites d'agglomération par télédétection : discussion méthodologique et application au cas de Huy (Belgique), in Dubois J.-M. *et al.* (eds.), *Télédétection des milieux urbains et périurbains*, Actes des journées scientifiques de Liège 1995, AUPELF-UREF, Liège, Belgique.
- Frankhauser P., 1988, Fractal aspects of urban systems, *Sonderforschungsbereich*, 230, 67-76.
- Frankhauser P., 1994, *La fractalité des structures urbaines*, Anthropos, Paris.

- Frankhauser P., Tannier C., 2005, A multi-scale morphological approach for delimiting urban areas, CUPUM 05: Computers in Urban Planning and Urban Management, CASA-UCL, 29 Jun – 1 July 2005, London, <http://www.cupum.org/>
- Guérois, M., 2003, Les formes des villes européennes vues du ciel - une contribution de l'image Corine Land Cover à la comparaison morphologique des grandes villes d'Europe occidentale, thèse de doctorat, Université Paris I.
- Guérois M., Paulus F., 2002, Commune centre, agglomération, aire urbaine : quelle pertinence pour l'étude des villes ? *Cybergeo: European Journal of Geography*, 212.
- Herold M., Couclelis H., Clarke K. C., 2005, The role of spatial metrics in the analysis and modeling of urban land use change, *Computers, Environment and Urban Systems*, 29, 369-399.
- Le Gléau J., Pumain D., Saint-Julien T., 1996, Villes d'Europe : à chaque pays sa définition, *Économie et Statistique*, 4/5, 294-295.
- Longley P., Batty M., 1989, On the Fractal Measurement of Geographical Boundaries, *Geographical Analysis*, 21(1), 47-67.
- Lowe D.G., 1989, Organization of smooth image curves at multiple scales, *International Journal of Computer Vision*, 3, 119-130.
- Mandelbrot B., 1982, *The fractal geometry of nature*, Freeman, San Francisco.
- Minkowski H., 1903, Volumen und oberfläche, *Mathematische Annalen*, 57, 447-495.
- Openshaw S., 1978, An empirical study of some zone-design criteria, *Environment and Planning A*, 10, 781-794.
- Parker D. C., Meretsky V., 2004, Measuring pattern outcomes in an agent-based model of edge-effect externalities using spatial metrics, *Agriculture, Ecosystems, and Environment*, 101, 233-250.
- Reitel B., Tannier C., 2003, Chapitre 2.3.2 : Bâle, in Frankhauser P. (dir.), Morphologie des villes émergentes en Europe à travers les analyses fractales, Rapport de recherche pour le Ministère de l'Équipement, 90-110.
- Tannier C., Frankhauser P., Houot H., Vuidel G., 2006, Optimisation de l'accessibilité aux aménités urbaines et rurales à travers le développement de modèles fractals d'urbanisation, XLII^{ème} Colloque de l'ASRDLF – XII^{ème} Colloque du GRERBAM, Sfax (Tunisie), Septembre 2006.
- Tannier C., Frankhauser P., Vuidel G., 2008, Morphological delimitation of urban areas: proposition of a methodology based on fractal geometry, *Computers Environment and Urban Systems*, article soumis.
- Treitz P., Howarth P., Gong P., 1992, Application of satellite and GIS technologies for land-cover and land-use mapping at the rural-urban fringe: a case study, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 58, 439-448.
- Vuidel G., Frankhauser P., Tannier C., 2006, Fractalyse 2.4, logiciel téléchargeable librement à l'adresse <http://fractalyse.org/>
- Weber C., 2001, Urban agglomeration delimitation using remote sensing, in Donnay J., Barnsley M. J., Longley P. A. (eds.), *Remote Sensing And Urban Analysis*, Taylor and Francis, London, 145-159.
- Weber C., Hirsch J., Serradj A., 1997, Pour une autre approche de la délimitation urbaine : application à Strasbourg (France), in Dubois J.-M. et al. (eds.), *Téledétection des milieux urbains et périurbains*, Actes des journées scientifiques de Liège 1995, AUPELF-UREF, Liège, Belgique.
- Webster C., 1995, Urban morphological fingerprints, *Environment and Planning B: Planning and design*, 22, 279-297.