

L'analyse morphologique des images *Landsat* des principales villes du monde

Depuis les années 1970, une nouvelle étude morphologique est apparue : celle des villes (Haggett, 1965). « L'objet de la morphologie urbaine est la forme urbaine, forme posant d'entrée de jeu, la question de sa définition. Ce que nous ont montré les premiers travaux de morphologie. [C'est] que la forme urbaine n'est jamais une donnée *a priori*, elle est toujours construite, un objet d'étude construit à partir d'une [hypothétique] définition, d'une représentation [et] d'un point de vue sur [sa] forme : [sur] la forme du tissu (développée dans les trois écoles de morphologie, italienne, française et anglaise), [et sur] la forme urbaine [elle-même] comme forme des tracés (développée par les géographes allemands de l'entre-deux-guerres ; Lavedan, 1936) » (Lévy, 2005). Ainsi, pour définir morphologiquement une ville, il existe trois possibilités : (1) soit la ville est définie comme une tache correspondant généralement à une agglomération morphologique au sens de François Moriconi-Ébrard (1994) ; (2) soit la ville est caractérisée par son réseau intra-urbain ; (3) soit la ville est définie par ses bâtiments (Brunhes, 1900 ; Robic ; 2003). Chacune de ces définitions fera l'objet d'un chapitre.

Si l'on définit la ville par sa tache, on s'intéresse exclusivement à son contour, à sa limite, mais comment définir ce qui fait parti de la ville et ce qui n'en fait pas parti ? Généralement, on choisit un seuil statistique basé sur une densité de population, ce qui suppose que l'on ait des connaissances sur la répartition de cette population. Cependant, si l'on ne possède aucune de ces informations, il faut utiliser un référent morphologique qui dépend de l'outil que l'on utilise. Par exemple, la télédétection ou la photographie aérienne permettent d'identifier les structures bâties, puisqu'elles ont une réflectance particulière. Par contre, si l'on caractérise la ville par son réseau intra-urbain, l'outil privilégié est sans doute le plan de la ville. Pour le faire apparaître clairement, cela nécessite une haute résolution, mais on néglige tout autre aspect de la ville : bâti dense, place, espaces verts *etc.* Enfin, la ville peut être identifiée grâce à la densité élevée de son bâti. Autrement dit, ici, la ville n'inclut pas les réseaux, les jardins publics ou privés, les terrasses, les places, les points d'eau, *etc.* Nombreux sont donc les outils permettant d'identifier le bâti : la télédétection, les photographies aériennes, les plans du cadastre, *etc.*

Ce chapitre va effectuer une analyse fractale de différentes taches urbaines extraites à partir des données des satellites *Landsat*. Il ne s'agit pas de réaliser une réflexion sur la télédétection, mais simplement d'extraire différentes taches urbaines de plusieurs villes du monde, et de les comparer grâce à l'aide d'une analyse fractale.

7.1. Extraction des données

Le site <http://sedac.ciesin.columbia.edu/ulandsat/data.jsp/> fournit des données gratuites, localisées et datées des principales villes du monde. Ses images ont été analysées et prétraitées par Christopher Small (2006). Un autre site, celui d'Ann Bryant (2007), <http://geology.com/world-cities/>, a mis à disposition des images datant toutes de 1999. Ces deux sites ont pour source les images des satellites du programme états-unien *Landsat*, et plus particulièrement de *Landsat 7*.

7.1.1. Les satellites *Landsat*

Le programme *Landsat* de la NASA débuta le 22 juillet 1972 avec la mise en orbite de *Landsat 1*. Six satellites furent lancés entre 1972 et 1999, et seuls *Landsat 5* (1984) et *Landsat 7* (1999) fonctionnent toujours aujourd'hui. Ces deux satellites suivent une orbite héliosynchrone à une altitude de 705 km, leur cycle orbital étant de 16 jours (Girard et Girard, 1999).

Landsat 5 possède un capteur TM (*Thematic Mapper*) à sept bandes spectrales (Robin, 2002). Les canaux 1, 2 et 3 captent la lumière visible, les canaux 4, 5 et 7, le proche et moyen infrarouge, et le canal 6, le rayonnement thermique. Chaque canal possède une résolution spectrale : $30 \times 30 \text{ m}^2$ pour les canaux 1, 2, 3, 4, 5, 7 et $80 \times 80 \text{ m}^2$ pour le canal 6. Toutefois, il est important de noter que chaque scène capturée (ou image) possède une résolution spatiale (taille du pixel) de $30 \times 30 \text{ m}^2$. *Landsat 7* possède, quant à lui, un capteur ETM+ (*Enhanced Thematic Mapper Plus*). La seule différence entre TM et ETM+ est l'existence d'un canal supplémentaire (le canal 8) dit panchromatique dont la résolution spectrale est $15 \times 15 \text{ m}^2$ (Robin, 2002).

Les deux bases de données citées précédemment ont principalement pour source le satellite *Landsat 7*. La base de données de Christopher Small (2006) est constituée d'images filtrées. En effet, seuls les canaux 2, 4 et 7 ont été utilisés pour déterminer les structures urbaines. Chaque image possède un pixel de $30 \times 30 \text{ m}^2$, et une étendue de $30 \times 30 \text{ km}^2$. Pour plus de détail, le lecteur pourra lire l'article de Christopher Small (2005) dans lequel il détaille tous ses prétraitements. La base d'Ann Bryant (2007) est plus problématique. En effet, il n'y a aucune description des données. Il semble qu'il s'agisse d'images *Landsat 7* brutes c'est-à-dire qu'elles possèdent l'intégralité de leurs canaux. Le pixel semble correspondre à $30 \times 30 \text{ m}^2$, mais l'étendue n'est pas normalisée comme dans la base de Christopher Small.

Ces deux bases sont utilisables, sous certaines conditions, dans l'optique d'une analyse fractale des taches urbaines que l'on peut extraire de ces images.

7.1.2. Les couleurs de l'urbain

Sur le site de SEDAC (*SocioEconomic Data and Applications Center*), organisme dont dépend Christopher Small, il est précisé que, sur chaque image traitée, l'aire urbaine peut être identifiée par les couleurs suivantes : le violet, le gris et le blanc. La végétation apparaît en vert, et l'eau en noir ou bleu foncé. Si l'on prend l'exemple de Beijing (Figure 62.a), à l'œil nu, on perçoit très bien la tache urbaine. Il serait très simple de l'extraire manuellement par l'intermédiaire d'un système d'information géographique. Toutefois, s'il faut réaliser cette tâche sur les soixante-dix huit images de la base de données de Christopher Small (2006) et sur les soixante-trois images d'Ann Bryant (2007), cela devient très contraignant. Aussi, pour traiter plus rapidement ces données, on peut utiliser une méthode de filtrage proposée par Hiba Alawad (Alawad et Grasland, 2009).

7.1.3. L'extraction de la tache urbaine

Initialement, cette méthode d'extraction semi-automatique avait été testée à des résolutions plus fines pour identifier les structures bâties dans les villes (Alawad et Grasland, 2009). Elle peut être étendue très facilement à l'extraction, grossière, d'une tache urbaine.

Il faut rappeler qu'une image est une matrice à deux dimensions, où chaque cellule (ou pixel) représente une couleur. Il existe plusieurs sortes de codage possible : le *RGB*, le *CMYK*, le niveau de gris, *etc.* Ici, chaque image a été codée en *RGB* (*Red, Green, Blue*). Ce qui signifie que chaque pixel possède trois bandes : une rouge, une verte et une bleue. Chaque bande possède une valeur allant de 0 à 255 : plus 16 millions de couleurs sont donc possibles.

Pour extraire le bâti, Hiba Alawad et Loïc Grasland utilisent la bande rouge ; ils se fixent un seuil, à partir des données, qui leur permet d'identifier l'intervalle dans lequel se trouvent les éléments bâtis (Alawad et Grasland, 2009). Cette méthode, très efficace, présente l'avantage de conserver l'hétérogénéité spatiale de l'image source, mais l'inconvénient de ne travailler que sur une seule bande. En ce qui concerne l'extraction des taches urbaines, la conservation de l'hétérogénéité des couleurs de l'image source apporte peu d'informations. Aussi, on peut mettre au point un filtre, très simple, qui limite cette hétérogénéité (Tonye *et alii*, 2000).

Le filtre est le suivant : dans chaque bande, toutes les valeurs comprises entre 0 et 99 vont être codées 0 ; toutes celles entre 100 et 199, 100 ; toutes celles entre 200 et 255, 200. Ainsi, on obtient une image possédant 27 couleurs potentielles (Figure 61), au lieu de 16 millions, ce qui permet une identification, grossière, mais efficace de la tache urbaine (Figure 62.b).

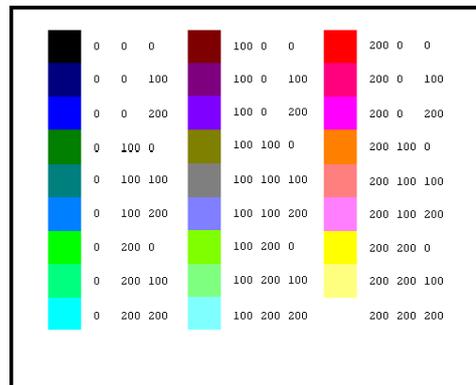


Figure 61. Couleurs potentielles obtenues par le filtre

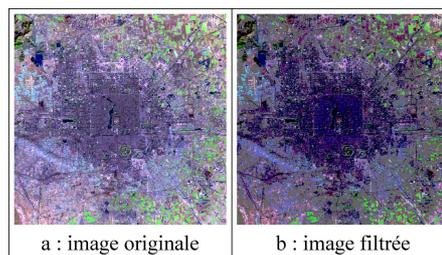


Figure 62. Extraction de la tache urbaine de Beijing

Le filtrage des couleurs ayant été effectué, il suffit d'identifier les couleurs de la tache urbaine. Dans le cas de Beijing, seule la couleur (0, 0, 100) permet d'identifier la tache urbaine. Toutefois, dans la majorité des images de Christopher Small (2006) et d'Ann Bryant (2007), il y a entre deux et cinq couleurs qui caractérisent la tache urbaine dans chacune des images. Celles-ci sont limitées à un choix parmi les dix couleurs suivantes : magenta foncé (200, 0, 200), violet (100, 0, 100), bleu gris (100, 100, 200), bleu foncé (0, 0, 100), gris (100, 100, 100), rose foncé (200, 100, 100), rouge (200, 0, 0), rouge foncé (100, 0, 0), vert gris (0, 100, 100), rose (200, 100, 100). Ce choix est contingent à chaque entité urbaine et dépend de ce que perçoit le modélisateur.

À partir de là, il est facile de convertir les couleurs choisies en blanc et les autres en noir ce qui donne le résultat final (Figure 63). Cette méthode a été appliquée aux soixante-huit images de la base de Christopher Small (2006) et aux soixante-trois images de celle d'Ann Bryant (2007). Cependant, elle ne fonctionne pas à chaque fois, seules 101 sur les 131 ont fourni une extraction convaincante. De plus, l'image obtenue comporte beaucoup de bruits, surtout aux grandes échelles.



Figure 63. Image monochrome de la tache urbaine de Beijing

7.1.4. Les limites de l'extraction

Plusieurs paramètres peuvent perturber l'extraction des taches urbaines : le manque de cohérence des couleurs de l'image originale, les ombres, les nuages, la trop forte prégnance d'entités physiques (montagnes, lacs), *etc.* Ces éléments seraient gênants dans la construction d'une base de données représentant l'image précise d'une agglomération à une échelle donnée. Cependant, l'objectif de ces extractions étant de réaliser une analyse fractale de chaque structure urbaine, ces « éléments perturbants » deviennent de simples bruits si leur nombre et leur étendue restent limités en termes de taille. Finalement, seuls les bruits dus à la répartition des couleurs elles-mêmes peuvent être source d'erreur dans la mesure de la dimension fractale de la tache de l'agglomération, ce qui est le principal critère de rejet des trente images non prises en compte. De plus, les pixels isolés ne représentent pas forcément des entités bâties. Leur surnombre est visible à grande échelle dans l'analyse fractale par comptage de boîtes carrées. Puis, progressivement en allant vers les petites échelles, ce bruit est éliminé par la méthode même de l'estimation de la dimension fractale. Cette observation se matérialise par une structure multifractale dont la gamme d'échelles aux hautes résolutions s'interprète comme un bruit. De plus, l'analyse par comptage de boîtes carrées joue le rôle d'un *buffer* (Le Corre *et alii*, 2000), puisque, au-delà de l'échelle de coupure entre les deux domaines fractals, en allant vers les petites échelles, on mesure la dimension fractale de la tache urbaine, et non plus celle du bruit des grandes échelles.

Seules soixante-deux images de Christopher Small (2006) et trente-neuf images d'Ann Bryant (2007) ont pu être utilisées et utilisables pour l'analyse fractale.

7.2. Analyse fractale des données

Une dimension fractale par comptage de boîtes carrées a été réalisée pour les 101 entités urbaines retenues. Chacune d'elle présente des cas de dimensions fractales constantes dans la gamme d'échelles d'analyse (de 30 m (ou 15 m) à l'étendue de l'image).

7.2.1. Les résultats

La Figure 64 présente les différentes taches urbaines et leurs caractéristiques. La première ligne donne le nom de l'agglomération ; la seconde, l'État ; la troisième, la résolution ; la quatrième l'échelle de coupure ; la cinquième, l'étendue ; la sixième, la dimension fractale observée aux grandes échelles appelée D_1 ; la septième, l'estimation de la dimension fractale aux petites échelles appelée D_2 ; la huitième, la date de la capture (toutes les dates étant antérieures à 1999 correspondent à une capture *Landsat 5*), la neuvième, les éléments perturbateurs, c'est-à-dire les entités physiques ou anthropiques ne correspondant pas à la structure urbaine qui sont, malgré tout, pris en compte dans le calcul de la dimension fractale, et la dixième, la base de données d'où provient l'image servant au calcul. D_1 et D_2 ne sont pas de même nature. D_1 correspond à la structure fractale d'un « bruit » présent aux grandes échelles. En effet, lors de l'extraction, la tache n'est pas fermée ; elle le devient à partir de l'échelle de coupure propre à chacune des images dont la moyenne est 425 ± 47 m. Une fois que la résolution est supérieure à cette échelle de coupure, une seconde dimension fractale D_2 apparaît. Cette dernière correspond à la mesure de la dimension de la tache urbaine proprement dite. Cette interprétation est étayée également par le fait que certaines villes ayant été extraites sans bruit telle que Accra, Bogota, Budapest, Buenos Aires 1, Calcutta 1, *etc.*, n'ont pas de transition fractal - fractal. Ainsi, seules les valeurs de D_2 doivent être étudiées, D_1 ne renvoyant qu'au bruit de l'extraction.

Il est important de noter que certaines agglomérations sont présentes dans les deux bases de données. Tel est le cas de Buenos Aires, de Calcutta, de Lagos, de Montreal, de Mumbai, de Paris, de Perth, de Rio de Janeiro, de Santiago, de Sao Paolo, de Sydney et de Tokyo. Toutefois, la valeur de ces doubles dimensions fractales est parfaitement comparable dans la mesure où, si l'étendue est différente, la taille du pixel est comparable, car soit il est identique (30×30 m²), soit il n'y a qu'un facteur quatre entre la taille des pixels des agglomérations ayant des pixels plus fins (15×15 m²). Il est donc possible de regrouper ces données.

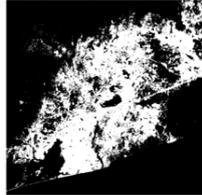
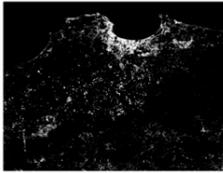
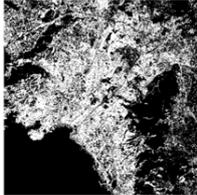
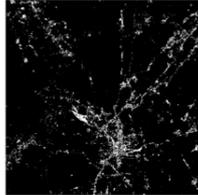
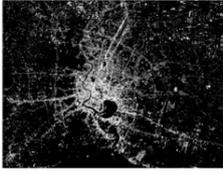
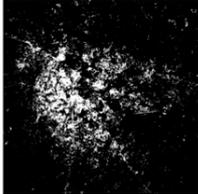
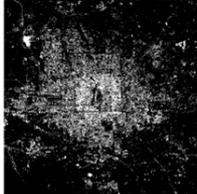
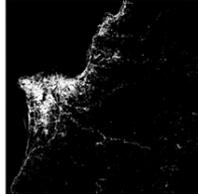
 <p>Accra Ghana $\varepsilon_{min} = 30$ m $\varepsilon_{max} = 28\,283$ m $D_2 = 1,743 \pm 0,006$ Date : 04/02/2000 Eléments perturbateurs : Aucun Source : Small, 2006</p>	 <p>Alger Algérie $\varepsilon_{min} = 30$ m $\varepsilon_C = 662$ m $\varepsilon_{max} = 35\,444$ m $D_1 = 1,170 \pm 0,009$ $D_2 = 1,711 \pm 0,014$ Date : 1999 Eléments perturbateurs : Aucun Source : Bryant, 2007</p>	 <p>Athènes Grèce $\varepsilon_{min} = 30$ m $\varepsilon_C = 75$ m $\varepsilon_{max} = 28\,283$ m $D_1 = 1,533 \pm 0,005$ $D_2 = 1,810 \pm 0,009$ Date : 06/08/1999 Eléments perturbateurs : Montagnes Source : Small, 2006</p>	 <p>Atlanta Etats-Unis, Géorgie $\varepsilon_{min} = 30$ m $\varepsilon_C = 909$ m $\varepsilon_{max} = 28\,283$ m $D_1 = 1,263 \pm 0,007$ $D_2 = 1,671 \pm 0,031$ Date : 28/09/1991 Eléments perturbateurs : Aucun Source : Small, 2006</p>
 <p>Bangkok Thaïlande $\varepsilon_{min} = 30$ m $\varepsilon_C = 234$ m $\varepsilon_{max} = 34\,554$ m $D_1 = 1,169 \pm 0,014$ $D_2 = 1,819 \pm 0,008$ Date : 1999 Eléments perturbateurs : Aucun Source : Bryant, 2007</p>	 <p>Bangalore Inde $\varepsilon_{min} = 30$ m $\varepsilon_C = 674$ m $\varepsilon_{max} = 28\,283$ m $D_1 = 1,340 \pm 0,006$ $D_2 = 1,709 \pm 0,023$ Date : 14/01/2001 Eléments perturbateurs : Aucun Source : Small, 2006</p>	 <p>Beijing Chine $\varepsilon_{min} = 30$ m $\varepsilon_C = 122$ m $\varepsilon_{max} = 28\,283$ m $D_1 = 1,097 \pm 0,009$ $D_2 = 1,739 \pm 0,011$ Date : 26/12/1988 Eléments perturbateurs : Aucun Source : Small, 2006</p>	 <p>Beyrouth Liban $\varepsilon_{min} = 30$ m $\varepsilon_C = 1\,056$ m $\varepsilon_{max} = 28\,283$ m $D_1 = 1,318 \pm 0,002$ $D_2 = 1,598 \pm 0,022$ Date : 22/06/2000 Eléments perturbateurs : Aucun Source : Small, 2006</p>

Figure 64-1. Taches urbaines de quelques agglomérations de par le monde

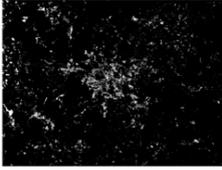
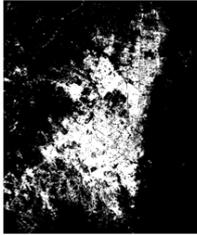
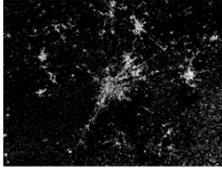
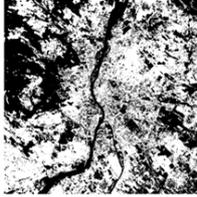
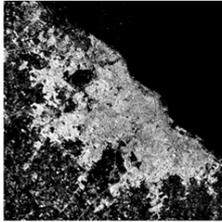
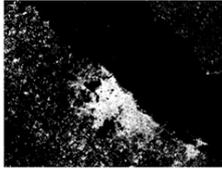
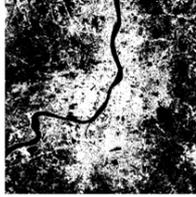
 <p>Berlin Allemagne $\varepsilon_{min} = 30$ m $\varepsilon_C = 769$ m $\varepsilon_{max} = 34\,544$ m $D_1 = 1,100 \pm 0,008$ $D_2 = 1,752 \pm 0,015$ Date : 1999 Eléments perturbateurs : Aucun Source : Bryant, 2007</p>	 <p>Bogota Colombie $\varepsilon_{min} = 30$ m $\varepsilon_{max} = 32\,859$ m $D_2 = 1,689 \pm 0,004$ Date : 05/08/1997 Eléments perturbateurs : Aucun Source : Small, 2006</p>	 <p>Brisbane Australie $\varepsilon_{min} = 30$ m $\varepsilon_C = 87$ m $\varepsilon_{max} = 28\,283$ m $D_1 = 1,368 \pm 0,012$ $D_2 = 1,830 \pm 0,008$ Date : 08/08/2001 Eléments perturbateurs : Aucune Source : Small, 2006</p>	 <p>Brussels Belgique $\varepsilon_{min} = 30$ m $\varepsilon_C = 320$ m $\varepsilon_{max} = 34\,544$ m $D_1 = 0,953 \pm 0,013$ $D_2 = 1,822 \pm 0,010$ Date : 1999 Eléments perturbateurs : Aucun Source : Bryant, 2007</p>
 <p>Budapest Hongrie $\varepsilon_{min} = 30$ m $\varepsilon_{max} = 28\,283$ m $D_2 = 1,833 \pm 0,006$ Date : 08/06/2000 Eléments perturbateurs : Nuages et leurs ombres Source : Small, 2006</p>	 <p>Buenos Aires 1 Argentine $\varepsilon_{min} = 15$ m $\varepsilon_{max} = 34\,544$ m $D_2 = 1,796 \pm 0,005$ Date : 20/12/2000 Eléments perturbateurs : Aucun Source : Small, 2006</p>	 <p>Buenos Aires 2 Argentine $\varepsilon_{min} = 30$ m $\varepsilon_C = 302$ m $\varepsilon_{max} = 34\,544$ m $D_1 = 1,386 \pm 0,003$ $D_2 = 1,668 \pm 0,009$ Date : 1999 Eléments perturbateurs : Aucun Source : Bryant, 2007</p>	 <p>Calcutta 1 Inde $\varepsilon_{min} = 30$ m $\varepsilon_{max} = 28\,283$ m $D_2 = 1,794 \pm 0,007$ Date : 15/11/1999 Eléments perturbateurs : Aucun Source : Small, 2006</p>

Figure 64-2. Taches urbaines de quelques agglomérations de par le monde

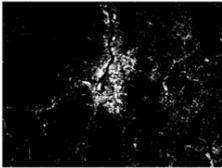
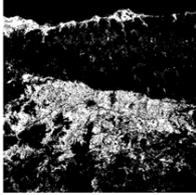
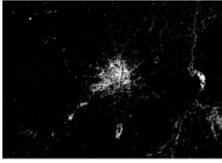
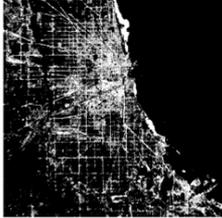
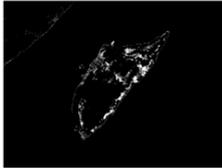
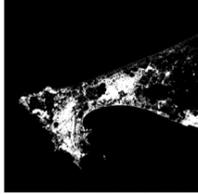
 <p>Calcutta 2 Inde $\varepsilon_{min} = 30$ m $\varepsilon_C = 824$ m $\varepsilon_{max} = 34\,544$ m $D_1 = 1,173 \pm 0,002$ $D_2 = 1,674 \pm 0,011$ Date : 1999 Eléments perturbateurs : Aucun Source : Bryant, 2007</p>	 <p>Calgary Canada $\varepsilon_{min} = 30$ m $\varepsilon_{max} = 28\,283$ m $D_2 = 1,754 \pm 0,006$ Date : 09/07/1999 Eléments perturbateurs : Aucun Source : Small, 2006</p>	 <p>Caracas Venezuela $\varepsilon_{min} = 30$ m $\varepsilon_C = 145$ m $\varepsilon_{max} = 28\,283$ m $D_1 = 1,479 \pm 0,004$ $D_2 = 1,714 \pm 0,007$ Date : 14/03/2001 Eléments perturbateurs : Aucun Source : Small, 2006</p>	 <p>Changchun Chine $\varepsilon_{min} = 30$ m $\varepsilon_C = 875$ m $\varepsilon_{max} = 34\,544$ m $D_1 = 1,011 \pm 0,007$ $D_2 = 1,743 \pm 0,014$ Date : 1999 Eléments perturbateurs : Lacs Source : Bryant, 2007</p>
 <p>Chennai Chine $\varepsilon_{min} = 30$ m $\varepsilon_C = 1\,332$ m $\varepsilon_{max} = 29\,733$ m $D_1 = 1,095 \pm 0,003$ $D_2 = 1,641 \pm 0,025$ Date : 1999 Eléments perturbateurs : Aucun Source : Bryant, 2007</p>	 <p>Chicago Etats-Unis, Illinois $\varepsilon_{min} = 30$ m $\varepsilon_C = 271$ m $\varepsilon_{max} = 42\,192$ m $D_1 = 1,553 \pm 0,006$ $D_2 = 1,758 \pm 0,013$ Date : 02/07/2001 Eléments perturbateurs : Aucun Source : Small, 2006</p>	 <p>Cozumel Mexique $\varepsilon_{min} = 30$ m $\varepsilon_C = 77$ m $\varepsilon_{max} = 28\,283$ m $D_1 = 1,078 \pm 0,009$ $D_2 = 1,330 \pm 0,005$ Date : 1999 Eléments perturbateurs : Aucun Source : Bryant, 2007</p>	 <p>Dakar Sénégal $\varepsilon_{min} = 30$ m $\varepsilon_{max} = 28\,283$ m $D_2 = 1,572 \pm 0,005$ Date : 04/11/1999 Eléments perturbateurs : Aucun Source : Small, 2006</p>

Figure 64-3. Taches urbaines de quelques agglomérations de par le monde

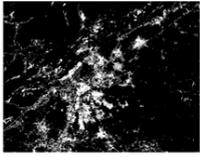
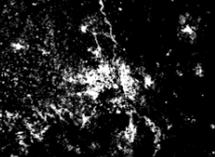
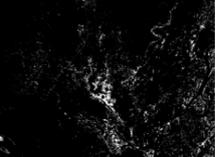
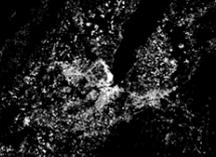
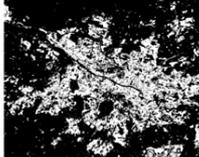
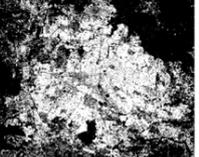
 <p>Damas Syrie $\varepsilon_{min} = 30$ m $\varepsilon_C = 536$ m $\varepsilon_{max} = 28\,283$ m $D_1 = 1,340 \pm 0,006$ $D_2 = 1,719 \pm 0,012$ Date : 22/06/2000 Eléments perturbateurs : Aucun Source : Small, 2006</p>	 <p>Delhi Inde $\varepsilon_{min} = 30$ m $\varepsilon_C = 526$ m $\varepsilon_{max} = 34\,544$ m $D_1 = 1,380 \pm 0,007$ $D_2 = 1,741 \pm 0,010$ Date : 1999 Eléments perturbateurs : Aucun Source : Bryant, 2007</p>	 <p>Dhaka Bangladesh $\varepsilon_{min} = 30$ m $\varepsilon_C = 487$ m $\varepsilon_{max} = 34\,544$ m $D_1 = 1,064 \pm 0,014$ $D_2 = 1,721 \pm 0,010$ Date : 1999 Eléments perturbateurs : Aucun Source : Bryant, 2007</p>	 <p>Dublin Irlande $\varepsilon_{min} = 30$ m $\varepsilon_C = 516$ m $\varepsilon_{max} = 31\,257$ m $D_1 = 1,329 \pm 0,006$ $D_2 = 1,713 \pm 0,013$ Date : 1999 Eléments perturbateurs : Vagues Source : Bryant, 2007</p>
 <p>Genève Suisse $\varepsilon_{min} = 30$ m $\varepsilon_C = 409$ m $\varepsilon_{max} = 34\,554$ m $D_1 = 1,329 \pm 0,010$ $D_2 = 1,756 \pm 0,011$ Date : 1999 Eléments perturbateurs : Aucun Source : Bryant, 2007</p>	 <p>Glasgow Royaume-Uni $\varepsilon_{min} = 30$ m $\varepsilon_{max} = 28\,283$ m $D_2 = 1,696 \pm 0,006$ Date : 26/06/1995 Eléments perturbateurs : Aucun Source : Small, 2006</p>	 <p>Guadalajara Mexique $\varepsilon_{min} = 30$ m $\varepsilon_C = 90$ m $\varepsilon_{max} = 28\,283$ m $D_1 = 1,509 \pm 0,007$ $D_2 = 1,824 \pm 0,009$ Date : 03/11/1999 Eléments perturbateurs : Aucun Source : Small, 2006</p>	 <p>Guangzhou Chine $\varepsilon_{min} = 30$ m $\varepsilon_C = 395$ m $\varepsilon_{max} = 28\,283$ m $D_1 = 1,459 \pm 0,007$ $D_2 = 1,771 \pm 0,016$ Date : 14/09/2000 Eléments perturbateurs : Aucun Source : Small, 2006</p>

Figure 64-4. Taches urbaines de quelques agglomérations de par le monde

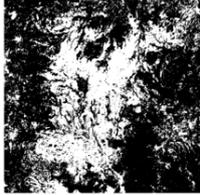
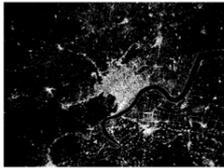
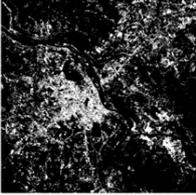
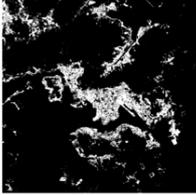
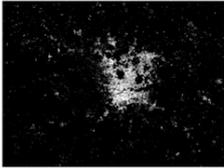
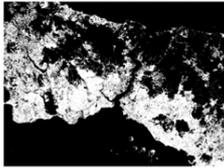
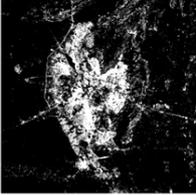
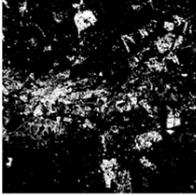
 <p>Guatemala Guatemala $\varepsilon_{min} = 30$ m $\varepsilon_{max} = 28\,283$ m $D_1 = 1,773 \pm 0,007$ Date : 24/03/1996 Eléments perturbateurs : Montagnes Source : Small, 2006</p>	 <p>Hangzhou Chine $\varepsilon_{min} = 30$ m $\varepsilon_C = 518$ m $\varepsilon_{max} = 34\,544$ m $D_1 = 1,256 \pm 0,009$ $D_2 = 1,770 \pm 0,011$ Date : 1999 Eléments perturbateurs : Aucun Source : Bryant, 2007</p>	 <p>Hanoi Viêt-nam $\varepsilon_{min} = 30$ m $\varepsilon_C = 312$ m $\varepsilon_{max} = 28\,283$ m $D_1 = 1,436 \pm 0,010$ $D_2 = 1,780 \pm 0,019$ Date : 09/12/1999 Eléments perturbateurs : Aucun Source : Small, 2006</p>	 <p>Hong Kong Chine $\varepsilon_{min} = 30$ m $\varepsilon_{max} = 28\,283$ m $D_2 = 1,565 \pm 0,005$ Date : 14/09/2000 Eléments perturbateurs : Aucun Source : Small, 2006</p>
 <p>Hyderabad Inde $\varepsilon_{min} = 30$ m $\varepsilon_C = 1\,032$ m $\varepsilon_{max} = 34\,554$ m $D_1 = 1,182 \pm 0,006$ $D_2 = 1,750 \pm 0,019$ Date : 1999 Eléments perturbateurs : Aucun Source : Bryant, 2007</p>	 <p>Istanbul Turquie $\varepsilon_{min} = 30$ m $\varepsilon_{max} = 34\,544$ m $D_2 = 1,755 \pm 0,003$ Date : 1999 Eléments perturbateurs : Aucun Source : Bryant, 2007</p>	 <p>Jaipur Inde $\varepsilon_{min} = 30$ m $\varepsilon_C = 154$ m $\varepsilon_{max} = 28\,283$ m $D_1 = 1,345 \pm 0,004$ $D_2 = 1,693 \pm 0,008$ Date : 07/02/2002 Eléments perturbateurs : Montagnes Source : Small, 2006</p>	 <p>Johannesbourg Afrique du Sud $\varepsilon_{min} = 30$ m $\varepsilon_C = 190$ m $\varepsilon_{max} = 28\,283$ m $D_1 = 1,338 \pm 0,004$ $D_2 = 1,660 \pm 0,010$ Date : 01/04/1991 Eléments perturbateurs : Aucun Source : Small, 2006</p>

Figure 64-5. Taches urbaines de quelques agglomérations de par le monde

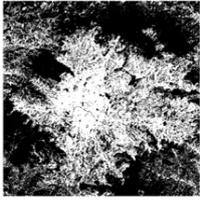
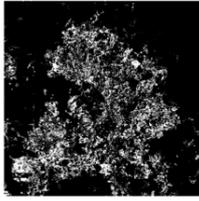
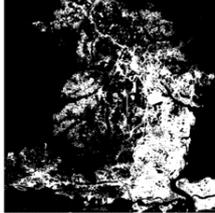
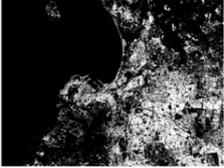
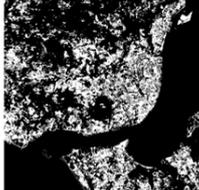
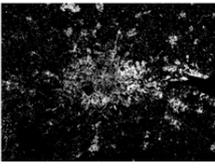
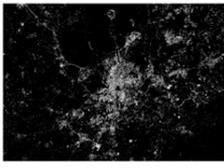
 <p>Katmandou Népal $\varepsilon_{min} = 30$ m $\varepsilon_C = 98$ m $\varepsilon_{max} = 28\,283$ m $D_1 = 1,550 \pm 0,003$ $D_2 = 1,829 \pm 0,009$ Date : 04/11/1999 Eléments perturbateurs : Aucun Source : Small, 2006</p>	 <p>Kuala Lumpur Malaisie $\varepsilon_{min} = 30$ m $\varepsilon_C = 121$ m $\varepsilon_{max} = 28\,283$ m $D_1 = 1,242 \pm 0,004$ $D_2 = 1,716 \pm 0,006$ Date : /02/2007 Eléments perturbateurs : Aucun Source : Small, 2006</p>	 <p>Lagos 1 Nigeria $\varepsilon_{min} = 30$ m $\varepsilon_{max} = 31\,257$ m $D_2 = 1,699 \pm 0,005$ Date : 06/02/2000 Eléments perturbateurs : Aucun Source : Small, 2006</p>	 <p>Lagos 2 Nigeria $\varepsilon_{min} = 30$ m $\varepsilon_{max} = 34\,544$ m $D_2 = 1,478 \pm 0,004$ Date : 1999 Eléments perturbateurs : Aucun Source : Bryant, 2007</p>
 <p>Le Cap Afrique du Sud $\varepsilon_{min} = 30$ m $\varepsilon_C = 82$ m $\varepsilon_{max} = 34\,544$ m $D_1 = 1,329 \pm 0,011$ $D_2 = 1,744 \pm 0,007$ Date : 1999 Eléments perturbateurs : Aucun Source : Bryant, 2007</p>	 <p>Lisbonne Portugal $\varepsilon_{min} = 30$ m $\varepsilon_{max} = 28\,283$ m $D_2 = 1,718 \pm 0,006$ Date : 14/03/1989 Eléments perturbateurs : Aucun Source : Small, 2006</p>	 <p>Londres Royaume-Uni $\varepsilon_{min} = 30$ m $\varepsilon_C = 399$ m $\varepsilon_{max} = 34\,544$ m $D_1 = 1,202 \pm 0,012$ $D_2 = 1,803 \pm 0,012$ Date : 1999 Eléments perturbateurs : Aucun Source : Bryant, 2007</p>	 <p>Madrid Espagne $\varepsilon_{min} = 30$ m $\varepsilon_C = 337$ m $\varepsilon_{max} = 34\,544$ m $D_1 = 1,066 \pm 0,016$ $D_2 = 1,786 \pm 0,009$ Date : 1999 Eléments perturbateurs : Aucun Source : Bryant, 2007</p>

Figure 64-6. Taches urbaines de quelques agglomérations de par le monde

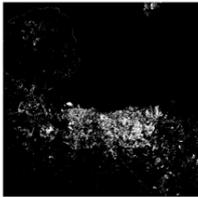
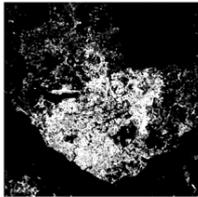
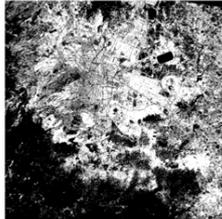
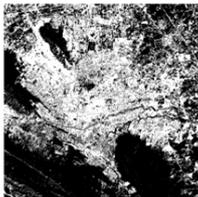
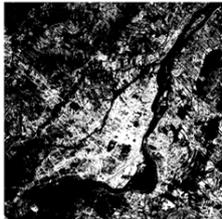
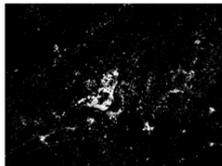
 <p>Managua Nicaragua $\varepsilon_{min} = 30$ m $\varepsilon_C = 258$ m $\varepsilon_{max} = 28\,283$ m $D_1 = 1,223 \pm 0,011$ $D_2 = 1,562 \pm 0,008$ Date : 25/03/1989 Eléments perturbateurs : Aucun Source : Small, 2006</p>	 <p>Manaus Brésil $\varepsilon_{min} = 30$ m $\varepsilon_{max} = 28\,283$ m $D_2 = 1,672 \pm 0,005$ Date : 11/08/2001 Eléments perturbateurs : Aucun Source : Small, 2006</p>	 <p>Melbourne Australie $\varepsilon_{min} = 15$ m $\varepsilon_{max} = 25\,591$ m $D_2 = 1,765 \pm 0,005$ Date : 05/10/2000 Eléments perturbateurs : Aucun Source : Small, 2006</p>	 <p>Mexico Mexique $\varepsilon_{min} = 15$ m $\varepsilon_{max} = 28\,283$ m $D_2 = 1,836 \pm 0,006$ Date : 21/03/2000 Eléments perturbateurs : Montagnes Source : Small, 2006</p>
 <p>Miami Etats-Unis, Floride $\varepsilon_{min} = 30$ m $\varepsilon_C = 328$ m $\varepsilon_{max} = 28\,283$ m $D_1 = 1,341 \pm 0,010$ $D_2 = 1,709 \pm 0,012$ Date : 25/05/2000 Eléments perturbateurs : Aucun Source : Small, 2006</p>	 <p>Monterrey Mexique $\varepsilon_{min} = 30$ m $\varepsilon_C = 76$ m $\varepsilon_{max} = 28\,283$ m $D_1 = 1,574 \pm 0,007$ $D_2 = 1,828 \pm 0,009$ Date : 28/11/1999 Eléments perturbateurs : Aucun Source : Small, 2006</p>	 <p>Montreal 1 Canada $\varepsilon_{min} = 15$ m $\varepsilon_C = 138$ m $\varepsilon_{max} = 28\,283$ m $D_1 = 1,560 \pm 0,003$ $D_2 = 1,806 \pm 0,009$ Date : 08/06/2001 Eléments perturbateurs : Champs Source : Small, 2006</p>	 <p>Montreal 2 Canada $\varepsilon_{min} = 30$ m $\varepsilon_C = 773$ m $\varepsilon_{max} = 34\,544$ m $D_1 = 1,014 \pm 0,003$ $D_2 = 1,713 \pm 0,011$ Date : 1999 Eléments perturbateurs : Aucun Source : Bryant, 2007</p>

Figure 64-7. Taches urbaines de quelques agglomérations de par le monde

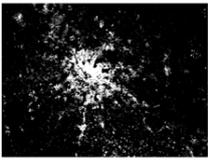
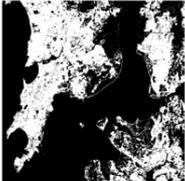
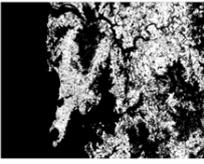
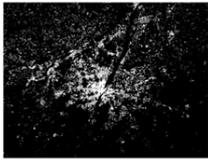
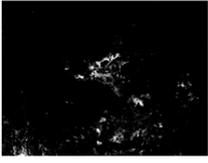
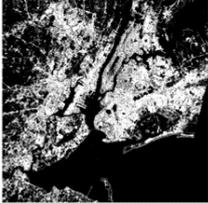
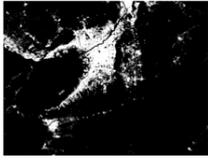
 <p>Moscou Russie $\varepsilon_{min} = 30$ m $\varepsilon_C = 593$ m $\varepsilon_{max} = 34\,544$ m $D_1 = 1,273 \pm 0,004$ $D_2 = 1,764 \pm 0,011$ Date : 1999 Eléments perturbateurs : Nuages et leurs ombres Source : Bryant, 2007</p>	 <p>Mumbai 1 (ancien nom : Bombay) Inde $\varepsilon_{min} = 30$ m $\varepsilon_{max} = 28\,283$ m $D_2 = 1,479 \pm 0,006$ Date : 11/01/2001 Eléments perturbateurs : Aucun Source : Small, 2006</p>	 <p>Mumbai 2 Inde $\varepsilon_{min} = 30$ m $\varepsilon_{max} = 34\,544$ m $D_2 = 1,763 \pm 0,005$ Date : 1999 Eléments perturbateurs : Aucun Source : Bryant, 2007</p>	 <p>Munich Allemagne $\varepsilon_{min} = 30$ m $\varepsilon_C = 436$ m $\varepsilon_{max} = 34\,544$ m $D_1 = 1,249 \pm 0,011$ $D_2 = 1,760 \pm 0,012$ Date : 1999 Eléments perturbateurs : Champs Source : Bryant, 2007</p>
 <p>Nairobi Kenya $\varepsilon_{min} = 30$ m $\varepsilon_C = 360$ m $\varepsilon_{max} = 34\,544$ m $D_1 = 1,190 \pm 0,008$ $D_2 = 1,758 \pm 0,009$ Date : 1999 Eléments perturbateurs : Aucun Source : Bryant, 2007</p>	 <p>New York Etats-Unis, New York $\varepsilon_{min} = 15$ m $\varepsilon_{max} = 28\,283$ m $D_2 = 1,781 \pm 0,005$ Date : 17/09/2000 Eléments perturbateurs : Image légèrement abimée à l'est Source : Small, 2006</p>	 <p>Nouvelle-Orléans Etats-Unis, Louisiane $\varepsilon_{min} = 30$ m $\varepsilon_C = 79$ m $\varepsilon_{max} = 28\,283$ m $D_1 = 1,428 \pm 0,012$ $D_2 = 1,802 \pm 0,007$ Date : 17/09/2000 Eléments perturbateurs : Aucun Source : Small, 2006</p>	 <p>Osaka Japon $\varepsilon_{min} = 30$ m $\varepsilon_{max} = 34\,544$ m $D_2 = 1,547 \pm 0,003$ Date : 1999 Eléments perturbateurs : Aucun Source : Bryant, 2007</p>

Figure 64-8. Taches urbaines de quelques agglomérations de par le monde

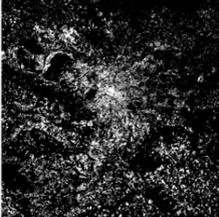
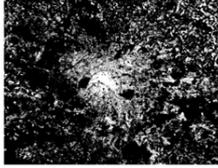
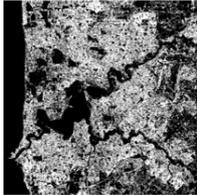
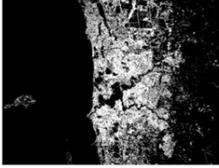
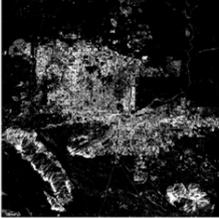
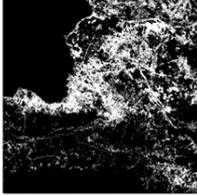
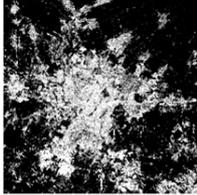
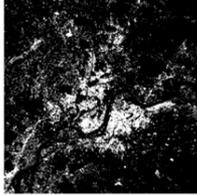
 <p>Paris 1 France $\varepsilon_{min} = 15$ m $\varepsilon_C = 238$ m $\varepsilon_{max} = 34\,544$ m $D_1 = 1,398 \pm 0,003$ $D_2 = 1,830 \pm 0,013$ Date : 09/05/1987 Eléments perturbateurs : Champs Source : Small, 2006</p>	 <p>Paris 2 France $\varepsilon_{min} = 30$ m $\varepsilon_C = 234$ m $\varepsilon_{max} = 34\,544$ m $D_1 = 1,371 \pm 0,010$ $D_2 = 1,816 \pm 0,008$ Date : 1999 Eléments perturbateurs : Champs Source : Bryant, 2007</p>	 <p>Perth 1 Australie $\varepsilon_{min} = 30$ m $\varepsilon_C = 71$ m $\varepsilon_{max} = 28\,283$ m $D_1 = 1,428 \pm 0,014$ $D_2 = 1,835 \pm 0,009$ Date : 23/08/2000 Eléments perturbateurs : Aucun Source : Small, 2006</p>	 <p>Perth 2 Australie $\varepsilon_{min} = 30$ m $\varepsilon_C = 70$ m $\varepsilon_{max} = 34\,544$ m $D_1 = 1,400 \pm 0,015$ $D_2 = 1,706 \pm 0,007$ Date : 1999 Eléments perturbateurs : Aucun Source : Bryant, 2007</p>
 <p>Phoenix Etats-Unis, Arizona $\varepsilon_{min} = 15$ m $\varepsilon_C = 167$ m $\varepsilon_{max} = 42\,193$ m $D_1 = 1,459 \pm 0,012$ $D_2 = 1,776 \pm 0,009$ Date : 19/04/2000 Eléments perturbateurs : Montagnes Source : Small, 2006</p>	 <p>Port-au-Prince Haïti $\varepsilon_{min} = 30$ m $\varepsilon_C = 169$ m $\varepsilon_{max} = 28\,283$ m $D_1 = 1,494 \pm 0,005$ $D_2 = 1,736 \pm 0,012$ Date : 02/07/1999 Eléments perturbateurs : Aucun Source : Small, 2006</p>	 <p>Puebla Mexique $\varepsilon_{min} = 30$ m $\varepsilon_C = 218$ m $\varepsilon_{max} = 28\,283$ m $D_1 = 1,564 \pm 0,006$ $D_2 = 1,797 \pm 0,012$ Date : 06/09/2000 Eléments perturbateurs : Aucun Source : Small, 2006</p>	 <p>Pyongyang Corée du Nord $\varepsilon_{min} = 30$ m $\varepsilon_C = 254$ m $\varepsilon_{max} = 28\,283$ m $D_1 = 1,286 \pm 0,008$ $D_2 = 1,773 \pm 0,012$ Date : 06/05/2000 Eléments perturbateurs : Aucun Source : Small, 2006</p>

Figure 64-9. Taches urbaines de quelques agglomérations de par le monde

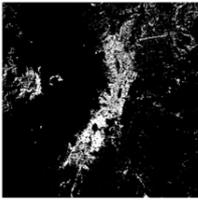
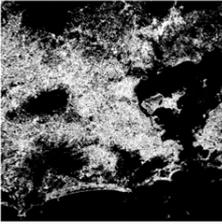
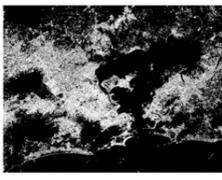
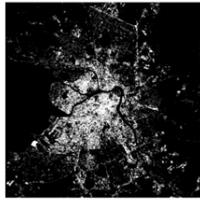
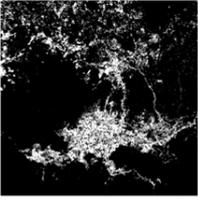
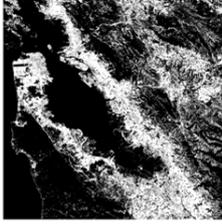
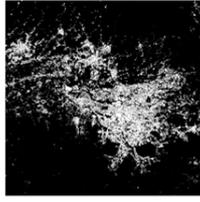
 <p>Quito Equateur $\varepsilon_{min} = 30$ m $\varepsilon_C = 526$ m $\varepsilon_{max} = 28\,283$ m $D_1 = 1,407 \pm 0,004$ $D_2 = 1,610 \pm 0,016$ Date : 14/11/1999 Eléments perturbateurs : Montagnes Source : Small, 2006</p>	 <p>Rio de Janeiro 1 Brésil $\varepsilon_{min} = 15$ m $\varepsilon_C = 38$ m $\varepsilon_{max} = 28\,283$ m $D_1 = 1,526 \pm 0,006$ $D_2 = 1,781 \pm 0,007$ Date : 28/10/2001 Eléments perturbateurs : Aucun Source : Small, 2006</p>	 <p>Rio de Janeiro 2 Brésil $\varepsilon_{min} = 30$ m $\varepsilon_C = 85$ m $\varepsilon_{max} = 34\,544$ m $D_1 = 1,375 \pm 0,018$ $D_2 = 1,760 \pm 0,005$ Date : 1999 Eléments perturbateurs : Aucun Source : Bryant, 2007</p>	 <p>Saint-Petersbourg Russie $\varepsilon_{min} = 30$ m $\varepsilon_C = 218$ m $\varepsilon_{max} = 28\,283$ m $D_1 = 1,298 \pm 0,011$ $D_2 = 1,718 \pm 0,009$ Date : 25/04/2000 Eléments perturbateurs : Aucun Source : Small, 2006</p>
 <p>Salt-Lake-City Etats-Unis, Utah $\varepsilon_{min} = 30$ m $\varepsilon_C = 298$ m $\varepsilon_{max} = 28\,283$ m $D_1 = 1,347 \pm 0,008$ $D_2 = 1,723 \pm 0,010$ Date : 14/08/1999 Eléments perturbateurs : Aucun Source : Small, 2006</p>	 <p>Salvador El Salvador $\varepsilon_{min} = 30$ m $\varepsilon_C = 238$ m $\varepsilon_{max} = 28\,283$ m $D_1 = 1,438 \pm 0,006$ $D_2 = 1,684 \pm 0,011$ Date : 31/12/1999 Eléments perturbateurs : Aucun Source : Small, 2006</p>	 <p>San Francisco Etats-Unis, Californie $\varepsilon_{min} = 15$ m $\varepsilon_{max} = 34\,544$ m $D_2 = 1,792 \pm 0,005$ Date : 07/07/1999 Eléments perturbateurs : Montagnes Source : Small, 2006</p>	 <p>San Jose Costa Rica $\varepsilon_{min} = 30$ m $\varepsilon_{max} = 28\,283$ m $D_2 = 1,642 \pm 0,006$ Date : 11/06/2001 Eléments perturbateurs : Nuages et leurs ombres Source : Small, 2006</p>

Figure 64-10. Taches urbaines de quelques agglomérations de par le monde

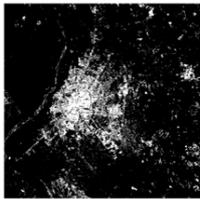
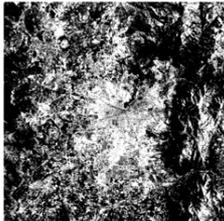
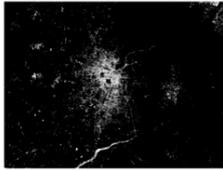
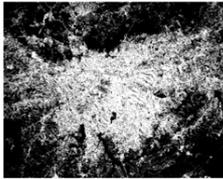
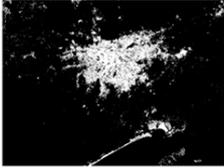
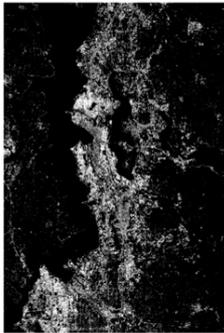
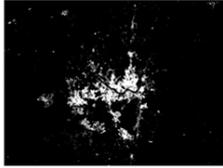
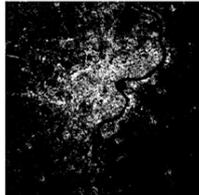
 <p>Santa Cruz Bolivie $\varepsilon_{min} = 30$ m $\varepsilon_C = 599$ m $\varepsilon_{max} = 28\,283$ m $D_1 = 1,391 \pm 0,005$ $D_2 = 1,724 \pm 0,018$ Date : 11/08/2001 Eléments perturbateurs : Aucun Source : Small, 2006</p>	 <p>Santiago 1 Chili $\varepsilon_{min} = 15$ m $\varepsilon_C = 81$ m $\varepsilon_{max} = 28\,283$ m $D_1 = 1,576 \pm 0,003$ $D_2 = 1,845 \pm 0,009$ Date : 26/12/1999 Eléments perturbateurs : Montagnes Source : Small, 2006</p>	 <p>Santiago 2 Chili $\varepsilon_{min} = 30$ m $\varepsilon_C = 698$ m $\varepsilon_{max} = 34\,544$ m $D_1 = 1,163 \pm 0,010$ $D_2 = 1,642 \pm 0,011$ Date : 1999 Eléments perturbateurs : Cours d'eau au sud Source : Bryant, 2007</p>	 <p>Sao Paulo 1 Brésil $\varepsilon_{min} = 15$ m $\varepsilon_{max} = 34\,544$ m $D_2 = 1,816 \pm 0,005$ Date : 17/06/2000 Eléments perturbateurs : Aucun Source : Small, 2006</p>
 <p>Sao Paulo 2 Brésil $\varepsilon_{min} = 30$ m $\varepsilon_{max} = 34\,544$ m $D_2 = 1,552 \pm 0,004$ Date : 1999 Eléments perturbateurs : Aucun Source : Bryant, 2007</p>	 <p>Seattle - Tacoma Etats-Unis, Washington $\varepsilon_{min} = 15$ m $\varepsilon_C = 276$ m $\varepsilon_{max} = 42\,193$ m $D_1 = 1,430 \pm 0,008$ $D_2 = 1,781 \pm 0,008$ Date : 25/09/2000 Eléments perturbateurs : Aucun Source : Small, 2006</p>	 <p>Séoul Corée du Sud $\varepsilon_{min} = 30$ m $\varepsilon_C = 2\,520$ m $\varepsilon_{max} = 34\,544$ m $D_1 = 1,339 \pm 0,003$ $D_2 = 1,600 \pm 0,016$ Date : 1999 Eléments perturbateurs : Aucun Source : Bryant, 2007</p>	 <p>Shanghai Chine $\varepsilon_{min} = 30$ m $\varepsilon_C = 483$ m $\varepsilon_{max} = 28\,283$ m $D_1 = 1,364 \pm 0,008$ $D_2 = 1,700 \pm 0,015$ Date : 02/06/1999 Eléments perturbateurs : Aucun Source : Small, 2006</p>

Figure 64-11. Taches urbaines de quelques agglomérations de par le monde

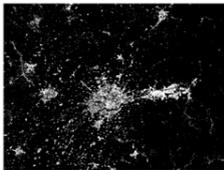
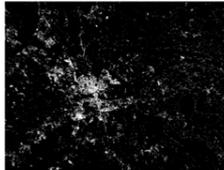
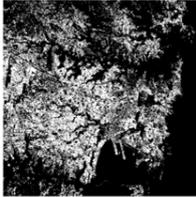
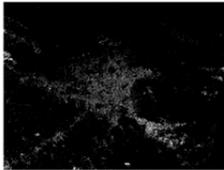
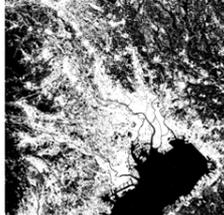
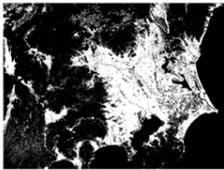
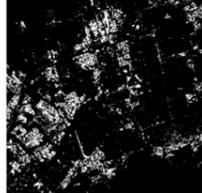
 <p>Shenyang Chine $\varepsilon_{min} = 30$ m $\varepsilon_C = 645$ m $\varepsilon_{max} = 34\,544$ m $D_1 = 1,179 \pm 0,002$ $D_2 = 1,759 \pm 0,012$ Date : 1999 Eléments perturbateurs : Aucun Source : Bryant, 2007</p>	 <p>Stockholm Suède $\varepsilon_{min} = 30$ m $\varepsilon_C = 543$ m $\varepsilon_{max} = 34\,544$ m $D_1 = 1,064 \pm 0,009$ $D_2 = 1,781 \pm 0,012$ Date : 1999 Eléments perturbateurs : Aucun Source : Bryant, 2007</p>	 <p>Sydney 1 Australie $\varepsilon_{min} = 30$ m $\varepsilon_C = 87$ m $\varepsilon_{max} = 28\,283$ m $D_1 = 1,369 \pm 0,011$ $D_2 = 1,800 \pm 0,008$ Date : 08/08/2001 Eléments perturbateurs : Bois Source : Small, 2006</p>	 <p>Sydney 2 Australie $\varepsilon_{min} = 30$ m $\varepsilon_C = 234$ m $\varepsilon_{max} = 32\,860$ m $D_1 = 1,162 \pm 0,012$ $D_2 = 1,497 \pm 0,007$ Date : 1999 Eléments perturbateurs : Aucun Source : Bryant, 2007</p>
 <p>Teheran Iran $\varepsilon_{min} = 30$ m $\varepsilon_C = 251$ m $\varepsilon_{max} = 34\,544$ m $D_1 = 0,916 \pm 0,026$ $D_2 = 1,606 \pm 0,007$ Date : 1999 Eléments perturbateurs : Aucun Source : Bryant, 2007</p>	 <p>Tokyo 1 Japon $\varepsilon_{min} = 15$ m $\varepsilon_{max} = 42\,193$ m $D_2 = 1,849 \pm 0,005$ Date : 21/05/1987 Eléments perturbateurs : Aucun Source : Small, 2006</p>	 <p>Tokyo 2 Japon $\varepsilon_{min} = 30$ m $\varepsilon_{max} = 34\,544$ m $D_2 = 1,748 \pm 0,005$ Date : 1999 Eléments perturbateurs : Nuages et leurs ombres Source : Bryant, 2007</p>	 <p>Toronto Canada $\varepsilon_{min} = 30$ m $\varepsilon_C = 553$ m $\varepsilon_{max} = 28\,283$ m $D_1 = 1,375 \pm 0,004$ $D_2 = 1,713 \pm 0,018$ Date : 05/08/1999 Eléments perturbateurs : Aucun Source : Small, 2006</p>

Figure 64-12. Taches urbaines de quelques agglomérations de par le monde

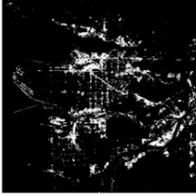
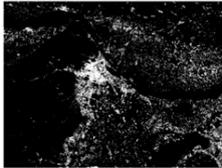
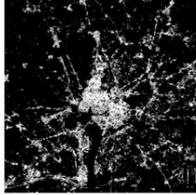
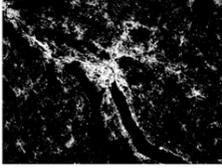
 <p>Vancouver Canada $\varepsilon_{min} = 30$ m $\varepsilon_C = 693$ m $\varepsilon_{max} = 28\,283$ m $D_1 = 1,353 \pm 0,002$ $D_2 = 1,641 \pm 0,013$ Date : 28/06/2000 Eléments perturbateurs : Bois Source : Small, 2006</p>	 <p>Venise Italie $\varepsilon_{min} = 30$ m $\varepsilon_C = 482$ m $\varepsilon_{max} = 28\,293$ m $D_1 = 1,429 \pm 0,001$ $D_2 = 1,637 \pm 0,016$ Date : 09/08/1992 Eléments perturbateurs : Aucun Source : Small, 2006</p>	 <p>Vienne Autriche $\varepsilon_{min} = 30$ m $\varepsilon_C = 441$ m $\varepsilon_{max} = 34\,544$ m $D_1 = 1,283 \pm 0,011$ $D_2 = 1,755 \pm 0,011$ Date : 1999 Eléments perturbateurs : Champs Source : Bryant, 2007</p>	 <p>Washington DC Etats-Unis, Virginie $\varepsilon_{min} = 30$ m $\varepsilon_C = 489$ m $\varepsilon_{max} = 28\,283$ m $D_1 = 1,402 \pm 0,005$ $D_2 = 1,761 \pm 0,019$ Date : 05/10/2001 Eléments perturbateurs : Aucun Source : Small, 2006</p>
 <p>Zurich Suisse $\varepsilon_{min} = 30$ m $\varepsilon_C = 554$ m $\varepsilon_{max} = 34\,544$ m $D_1 = 1,317 \pm 0,006$ $D_2 = 1,781 \pm 0,012$ Date : 1999 Eléments perturbateurs : Aucun Source : Bryant, 2007</p>			

Figure 64-13. Taches urbaines de quelques agglomérations de par le monde

Si l'on considère que ces douze images en double sont indépendantes, la combinaison des estimations (valeurs et erreurs) se calcule de la manière suivante : soient $w_i = \frac{1}{\sigma_i^2}$ et $w = \sum_i w_i$ alors la moyenne vaut $\hat{\mu} = \frac{1}{w} \sum_i w_i D_i$, où D_i est la dimension fractale, et l'erreur vaut $\hat{\sigma} = \frac{1}{\sqrt{w}}$. Si on applique cette méthode statistique, on peut proposer une estimation globale de la dimension fractale des douze villes en double (Figure 65).

Agglomération	Dimension fractale corrigée	Erreur corrigée
Buenos Aires	1,766	0,004
Calcutta	1,759	0,006
Lagos	1,564	0,003
Montreal	1,769	0,007
Mumbai	1,757	0,004
Paris	1,820	0,007
Perth	1,755	0,006
Rio de Janeiro	1,767	0,004
Santiago	1,764	0,007
São Paulo	1,655	0,003
Sydney	1,628	0,005
Tokyo	1,798	0,004

Figure 65. Tableau présentant les corrections des dimensions fractales des douze agglomérations en double

Ces corrections étant effectuées, il est possible de dresser une statistique de la dimension fractale observée pour chacune de ces agglomérations (Figure 66). On suppose que la loi des grands nombres atténue le bruit contenu dans chacune des images analysées, et qu'il s'agit d'une distribution gaussienne en première approximation. La statistique est centrée autour de la valeur $1,7 \pm 0,1$.

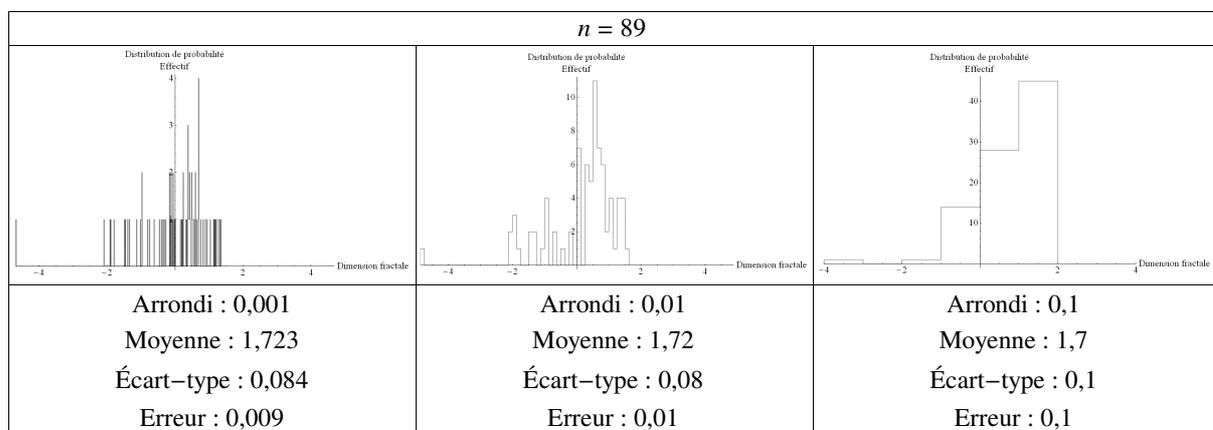


Figure 66. Distribution de probabilité de la dimension fractale centrée et réduite des différentes villes

7.2.2. La critique des données extraites

Pour être certain que cette moyenne n est pas biaisée par les tailles des différentes images, il faut isoler les deux sources de données et dresser leur statistique respective.

Les données de Christopher Small présentent une distribution statistique (Figure 67) analogue à la Figure 66. Il en est de même avec les données d'Ann Bryant (Figure 68). De plus, la part des deux sources différentes (1,737 et 1,705) dans la valeur moyenne (1,723) est de l'ordre de 50% ($1,737 - 1,723 = 0,014$ et $1,723 - 1,705 = 0,018$). Autrement dit, les deux sources de données sont comparables, l'une ne domine pas l'autre.

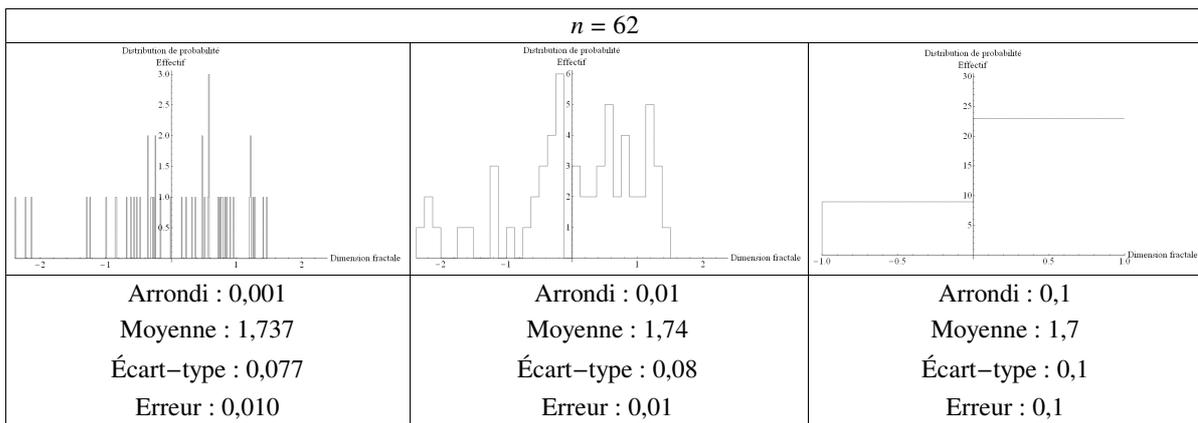


Figure 67. Distribution de probabilité de la dimension fractale centrée et réduite de la base de Christopher Small

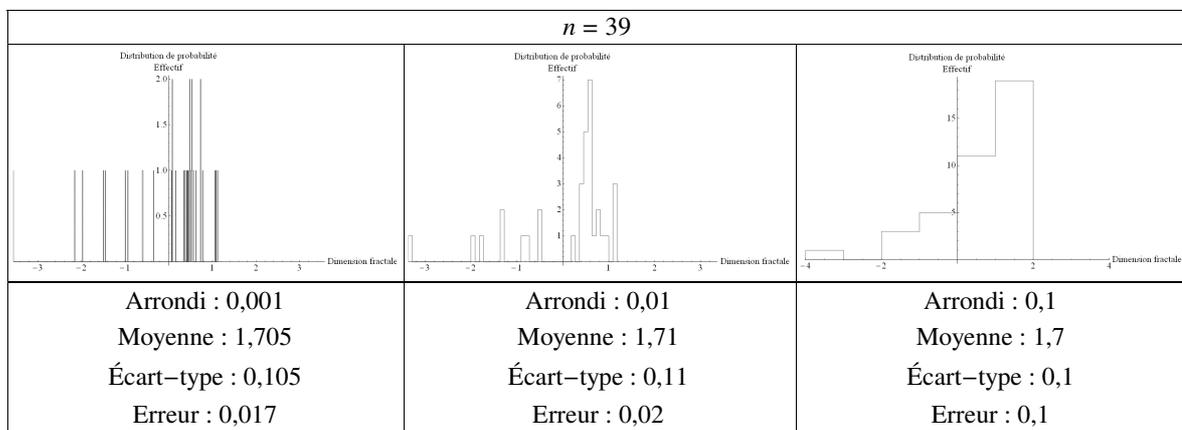


Figure 68. Distribution de probabilité de la dimension fractale centrée et réduite de la base d'Ann Bryant

7.3. Interprétations

Comment expliquer cette dimension fractale constante ? Plusieurs hypothèses peuvent être formulées. Tout d'abord, la dimension fractale est peut-être liée à la localisation des taches sur l'espace terrestre. Ensuite, elle pourrait être reliée à la population contenue dans cette tache. Enfin, elle pourrait être reliée à la surface relative des taches.

7.3.1. Dimension fractale et localisation des taches

La localisation des taches mesurées (Figure 69) permet de constater qu'il n'existe aucun lien entre la répartition et les aires culturelles, même si l'on constate sur la carte quelques nids au niveau des grands foyers de peuplement (Europe, Inde, Chine et partie est des États-Unis) autour desquels les dimensions fractales sont plus faibles que ceux-ci. Autrement dit, la dimension fractale de chacune de ces taches est indépendante de sa localisation. En effet, que la ville suive un plan hippodamien ou un plan circulaire ou qu'elles apparaissent sous forme d'une tache « étoilée », la dimension fractale reste très proche de 1,7. Qu'en est-il du rapport entre la dimension fractale et de la population contenue dans cette tache ?

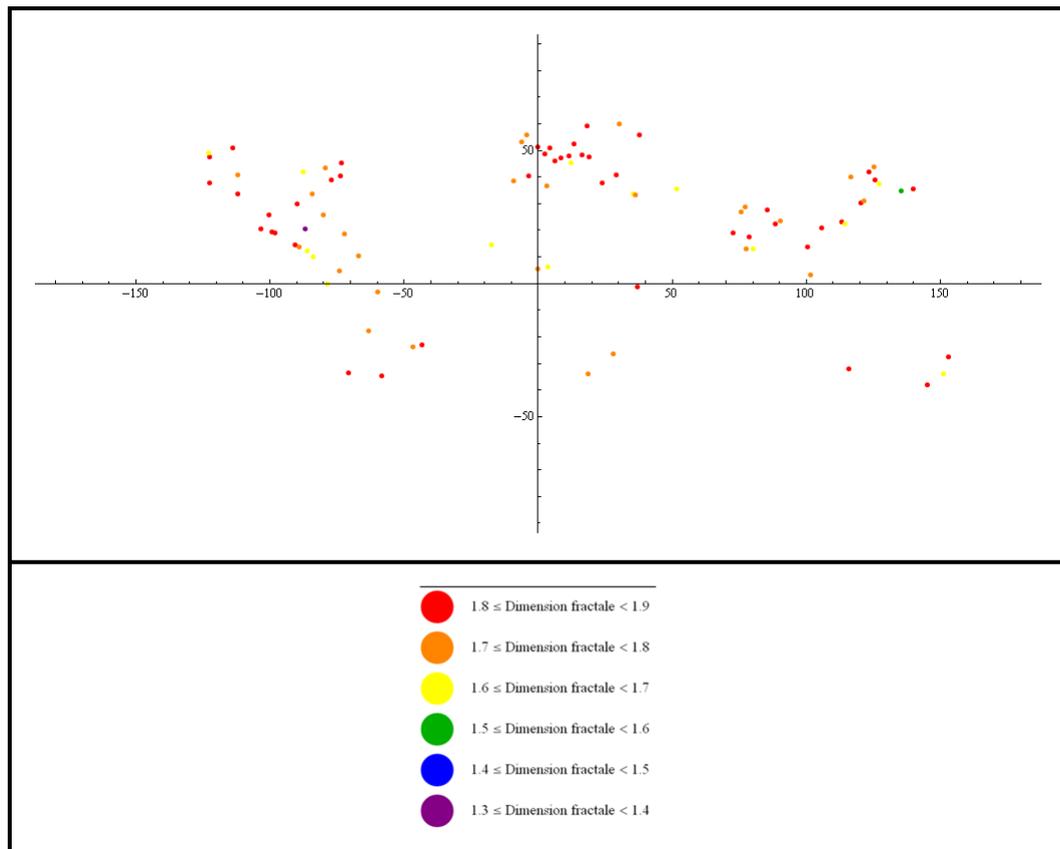


Figure 69. Localisation des dimensions fractales de chacune des taches urbaines mesurées

7.3.2. Dimension fractale et population urbaine

Pierre Frankhauser (1994) a montré qu'il existait des liens entre la dimension fractale et la population urbaine. Les données de la population sont issues de la base *Tageo* qui sera expliquée en détail dans le chapitre 16. La valeur que fournit cette base ne concerne que la ville principale, et non la totalité de la tache formant l'agglomération morphologique. Toutefois, la Figure 70 et la Figure 71 semblent indiquer l'inverse des résultats de Pierre Frankhauser : il n'existe aucun lien entre la dimension fractale et la population de la ville principale de la tache. Qu'en est-il de la dimension fractale et de la surface relative ?

Tache	D_2	Population	Tache	D_2	Population	Tache	D_2	Population
Accra	1.743	1 719 100	Hangzhou	1.77	1 881 500	Port-au-Prince	1.736	1 156 400
Alger	1.711	1 661 000	Hanoi	1.78	1 420 400	Puebla	1.797	1 370 800
Athènes 1	1.81	762 100	Hong Kong	1.565	7 018 600	Pyongyang	1.773	2 811 500
Atlanta	1.671	423 900	Hyderabad	1.75	3 654 900	Quito	1.61	1 466 300
Bangalore	1.709	4 547 300	Istanbul	1.755	9 592 200	Rio de Janeiro 1	1.767	6 150 200
Bangkok	1.818	5 455 200	Jaipur	1.693	2 462 500	Saint-Petersbourg	1.718	4 079 400
Beijing 1	1.739	7 209 900	Johannesbourg	1.66	1 975 500	Salt-Lake-City	1.723	179 900
Berlin	1.752	3 396 300	Katmandou	1.829	743 300	Salvador	1.684	513 400
Beyrouth	1.598	1 185 300	Kuala Lumpur	1.716	1 410 300	San Francisco	1.792	746 900
Bogota	1.689	6 981 500	Lagos 1	1.564	8 682 200	San Jose	1.642	340 100
Brisbane	1.83	1 598 600	Le Cap	1.744	2 984 100	Santa Cruz	1.724	1 196 100
Brussels	1.822	1 005 800	Lisbonne	1.718	560 700	Santiago 1	1.764	4 434 900
Budapest	1.833	1 727 300	Londres	1.803	7 593 300	Sao Paolo 1	1.655	10 260 100
Buenos Aires 1	1.766	11 928 400	Madrid 2	1.786	3 167 000	Seattle-Tacoma	1.781	767 200
Calcutta 1	1.759	4 852 800	Managua	1.562	1 113 100	Seoul	1.6	10 165 400
Calgary	1.754	938 300	Manaus	1.672	1 615 700	Shanghai 1	1.7	13 278 500
Caracas	1.714	1 967 800	Melbourne	1.765	3 666 000	Shenyang	1.759	3 527 800
Changchun	1.743	2 337 000	Mexico 1	1.836	8 705 100	Stockholm	1.781	1 250 400
Chennai	1.641	4 466 900	Miami	1.709	380 500	Sydney 1	1.628	4 277 200
Chicago	1.553	2 862 400	Monterrey	1.828	1 142 900	Teheran	1.606	7 317 200
Cozumel	1.33	69 400	Montreal 1	1.769	3 256 300	Tokyo 1	1.798	8 294 200
Dakar	1.572	2 613 700	Moscou	1.764	11 102 300	Toronto 1	1.713	4 551 800
Damas	1.719	1 614 500	Mumbai 1	1.757	12 622 500	Vancouver 1	1.641	1 836 500
Delhi	1.741	10 400 900	Munich	1.76	1 241 100	Venise 1	1.637	271 800
Dhaka	1.721	5 818 600	Nairobi	1.758	2 504 400	Vienne 2	1.755	1 504 100
Dublin	1.713	1 027 900	New York	1.781	8 091 700	Washington DC	1.761	556 500
Genève	1.756	181 200	Nouvelle-Orléans	1.802	466 600	Zurich	1.781	347 900
Glasgow	1.696	1 081 800	Osaka	1.547	2 596 700			
Guadalajara 1	1.824	1 672 000	Paris 1	1.82	2 107 700			
Guangzhou	1.771	3 244 900	Perth 1	1.755	1 412 900			
Guatemala	1.773	999 400	Phoenix	1.776	1 409 900			

Figure 70. Taches urbaines, dimensions fractales mesurées et population de la ville principale

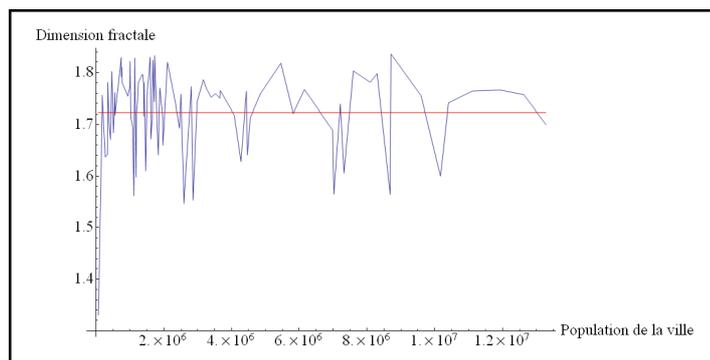


Figure 71. Population de la ville principale et dimension fractale de la tache

7.3.3. Dimension fractale et surface relative

On appelle surface relative S_R le rapport entre la surface que représentent les « pixels villes » S_N en mètre carré sur la surface totale de l'image S_T en mètre carré.

$$S_R = \frac{S_N}{S_T} \times 100$$

S_N et S_T sont calculées à partir de la résolution de chaque image (ε_{min}) et du nombre de « pixels villes » extrait N_V (ou le nombre total de pixels N_T).

$$S_N = N_V \times \varepsilon_{min}^2$$

$$S_T = N_T \times \varepsilon_{min}^2$$

La Figure 72 montre qu'il n'existe aucun lien entre la surface relative et la dimension fractale de chacune des taches.

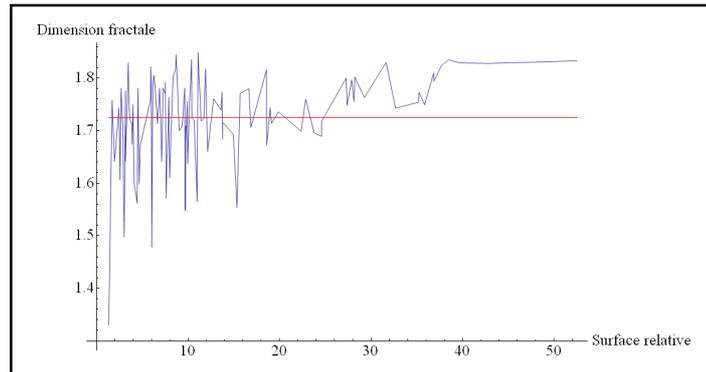


Figure 72. Surface relative et dimension fractale de chacune des taches

L'analyse fractale de l'organisation spatiale de différentes agglomérations mondiales aboutit à un résultat étonnant : pour une même résolution initiale (30 m), on observe une dimension fractale moyenne proche de 1,7, quelle que soit la forme géométrique apparente de la ville. Ce résultat est en accord avec l'hypothèse de Pierre Frankhauser d'après des calculs réalisés sur Berlin et Montbéliard (Frankhauser, 1994), sur Besançon (Frankhauser, 1998) et sur Bruxelles (Keersmacker *et alii*, 2004) qui proposait un modèle théorique de type « tapis de Warclaw Sierpinski » dont la dimension fractale était proche de 1,7.

De plus, cette dimension fractale constante prouve que c'est par l'étude de l'organisation multi-échelle que l'on a pu découvrir un invariant intrinsèque à l'organisation des agglomérations morphologiques que représentent les taches. La dimension fractale permet aussi de classer les différentes villes du monde en fonction de leur niveau d'organisation scalaire, mais sans que cela soit facilement interprétable. Pour preuve, il faut ajouter qu'il n'a pas été possible de relier cet indicateur à d'autres variables « plus classiques » en géographie, telles que la population de la ville principale, la surface de la tache urbaine ou la répartition même de ces taches à l'échelle du monde à nuancer en fonction des pistes évoquées ci-dessus et à vérifier. Quel est donc le processus engendrant ces morphologies si différentes d'un point de vue spatiale ? Ces processus sont-ils eux-mêmes fractales ? Enfin, l'extraction ayant été approximative, il faut vérifier ce résultat sur deux cas : l'un sur un plan de ville (Avignon), l'autre sur une répartition des bâtiments d'une ville (Montbéliard). Cela permettra également de répondre aux deux questions précédentes.

