



**HAL**  
open science

## Discontinuités, catastrophes et réseaux urbains : le modèle Rémus

Dominique Badariotti, Arnaud Banos, Diego Moreno

► **To cite this version:**

Dominique Badariotti, Arnaud Banos, Diego Moreno. Discontinuités, catastrophes et réseaux urbains : le modèle Rémus. 14èmes journées de Rochebrune,, Jan 2007, France. pp.7-21. halshs-00264317

**HAL Id: halshs-00264317**

**<https://shs.hal.science/halshs-00264317>**

Submitted on 15 Mar 2008

**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.

# **Discontinuités, catastrophes et réseaux urbains : le modèle Remus**

Dominique Badariotti

Dept. De Géographie, Université de Pau et des Pays de l'Adour, France

**`mailto:dominique.badariotti@univ-pau.fr`**

Arnaud Banos

Dept. De Géographie, Université Louis Pasteur, France

**`mailto:arnaud@lorraine.u-strasbg.fr`**

Diego Moreno Sierra

Dept. De Géographie, Université de Pau et des Pays de l'Adour, France

**`mailto:diego.moreno@etud.univ-pau.fr`**

## **Résumé**

D'un point de vue urbanistique, une ville est constituée d'une succession de ruptures et de discontinuités morphologiques. Ces discontinuités, formées par les différents types de tissus urbains, ont un impact sur le fonctionnement de la ville et donc sur les individus qui l'habitent ou la visitent. Même les réseaux urbains, qui ont pour fonction d'articuler les différentes zones de la ville, induisent une fragmentation de l'espace. Or, l'effet de ces discontinuités morphologiques sur la dynamique du système urbain reste méconnu.

Le modèle Remus représente sous la forme d'un graphe mathématique les relations de voisinage par les réseaux de circulation et permet d'effectuer des simulations à l'intérieur de la ville à l'aide d'un automate. A l'aide de cet outil, il est possible d'étudier les discontinuités induites dans les dynamiques spatiales urbaines, ou de limiter les conséquences de phénomènes catastrophiques au sein des villes.

# 1 Introduction

Pour René Thom, une catastrophe est un changement brutal dans la dynamique d'un système qui permet au système de subsister alors qu'il devrait cesser d'exister [5] et qui se matérialise par un seuil ou une discontinuité.

Nous proposons dans cet article une analyse des ruptures et des discontinuités urbaines, tant structurelles que fonctionnelles, mises en évidence par le modèle REMUS (Reticular Model for Urban Simulation). Cette analyse cherchera à mettre en relation les discontinuités observées et la notion de catastrophe telle que définie ci-dessus.

Le modèle Remus représente sous la forme d'un graphe mathématique les entités spatiales du bâti reliées entre elles par les voies de communication urbaines (graphe urbain) ; il permet ainsi de calculer la distance-temps entre bâtiments par le réseau. Ce premier calcul conduit à l'extraction de différents graphes, dont le graphe fonctionnel des distances-temps entre les immeubles et le graphe de relations de voisinage qui représente le voisinage par le réseau pour un certain seuil de temps de trajet et pour un mode de transport donné.

A travers le calcul et l'extraction de ces différents graphes, le modèle Remus permet de repérer les proximités et les ruptures dans la structure urbaine en faisant abstraction des proximités purement euclidiennes puisque le voisinage utilisé passe par les voies de circulation. A l'aide de cette formalisation, il permet de montrer quelles sont les discontinuités induites localement et globalement dans les dynamiques spatiales urbaines par sa structuration morphologique basée sur le plan viaire.

## 2 Le contexte morphologique urbain

Les constructions qui forment la matière physique de la ville se caractérisent par leurs traits géométriques (taille, forme) et géographiques (emplacement) propres. Ces caractéristiques interviennent dans la définition de la géométrie des îlots urbains et dans le dessin du cheminement des rues (notamment dans les zones de bâti contigu) et induisent par conséquent les relations de proximité entre bâtiments. Des bâtiments proches, voire contigus, peuvent être peu accessibles entre eux en raison de la configuration spatiale du réseau. Par contre, des zones très éloignées peuvent être « rapprochées » par des voies rapides qui les communiquent de manière préférentielle. Ces différenciations spatiales induites par les réseaux et les modes de transport sont aussi importantes dans le fonctionnement de la ville que la forme du bâti.

On peut considérer la ville comme un ensemble d'unités spatiales articulées par des réseaux. La continuité spatiale de ces unités en milieu urbain contraste avec les discontinuités proximales qui conditionnent le fonctionnement de la ville. L'analyse des ruptures dans la proximité intra-urbaine peut apporter des

éléments intéressants pour comprendre les dynamiques spatiales de la ville. C'est dans ce sens-là que s'oriente cette étude.

Les automates géographiques permettent d'explorer les dynamiques urbaines en se basant sur les relations de proximité entre entités spatiales. L'introduction du réseau dans la structure spatiale des automates pourrait induire des discontinuités temporelles dans les processus urbains simulés. Il est donc nécessaire de prendre en compte l'hétérogénéité de l'espace urbain dans ces modèles, afin d'étudier l'effet des discontinuités morphologiques sur la dynamique du système urbain.

### 3 La modélisation des voisinages réseau

Les relations géographiques entre entités spatiales sont de différents types : certaines s'expriment dans l'espace directement environnant par des relations euclidiennes (voisinage visuel, diffusion du bruit ou d'un polluant), d'autres s'expriment en suivant le cheminement des rues par des relations réticulaires (diffusion des déplacements, par exemple). Il importe donc d'utiliser une représentation susceptible de faciliter l'étude conjointe de ces différents types d'interactions spatiales.

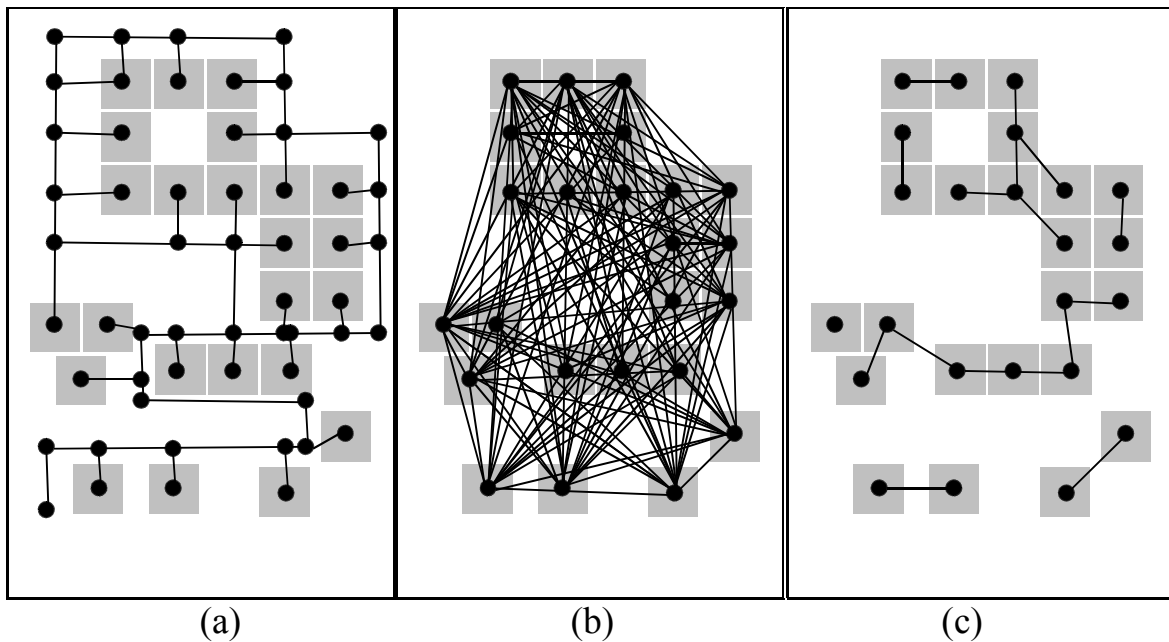
Il est possible de représenter les bâtiments, unités morphologiques élémentaires, comme les nœuds d'un graphe mathématique [1], tandis que les relations d'accessibilité entre les bâtiments peuvent être décrites comme les arcs du graphe. On peut aussi considérer que deux unités spatiales sont voisines si la distance euclidienne entre leurs deux centroïdes est inférieure à une distance  $d_{seuil}$  donnée. Le voisinage d'un bâtiment est alors fortement contraint par l'agencement des édifications, au point que des modifications minimales de  $d_{seuil}$  peuvent avoir des répercussions globales de grande ampleur. Les distances euclidiennes impliquent toutefois, au-delà des avantages techniques procurés, d'accepter l'hypothèse d'un espace fondamentalement isotrope : pour une distance seuil donnée, le graphe de voisinage ne dépend que de l'agencement spatial des unités  $U_i$ . Or, il est évident que l'existence de réseaux de transport aux capacités différenciées, vient perturber fortement cette hypothèse. Ainsi, raisonner en terme d'accessibilité réseau, pour un mode de transport donné, revient à introduire l'anisotropie fondamentale de l'espace géographique.

L'application REMUS (Reticular Model for Urban Simulation) [3], créée en collaboration avec le Laboratoire d'Informatique de l'Université de Pau et des Pays de l'Adour, permet de générer le graphe de voisinage réseautique en trois étapes (Figure 1) :

1. la construction d'un **graphe urbain**  $G(S,A)$ , dont les sommets incluent les nœuds du réseau routier et les bâtiments, et dont les arcs sont constitués de tronçons de route et de connecteurs bâti/route.
2. le calcul des plus courts chemins avec l'algorithme de Floyd [2] afin de

calculer le temps de trajet entre tous les couples de sommets  $\{S_i ; S_j\}$  du graphe  $G(S,A)$ . Ce procédé aboutit à la création d'un **graphe fonctionnel**, plein et non planaire  $G'(U | U \subset S, K)$ , constitué des sommets représentant les bâtiments et des arcs représentant les distances minimales de parcours par le réseau entre toutes les paires possibles de bâtiments.

- la construction du **graphe de voisinage**  $G_t''(U, R_t / R_t \subset K)$ , sous-graphe du graphe fonctionnel, dont les sommets représentent les bâtiments et les arcs les relations de voisinage pour une distance  $d_{seuil}$ , tel que,  $d(U_i; U_j) < d_{seuil}$ .



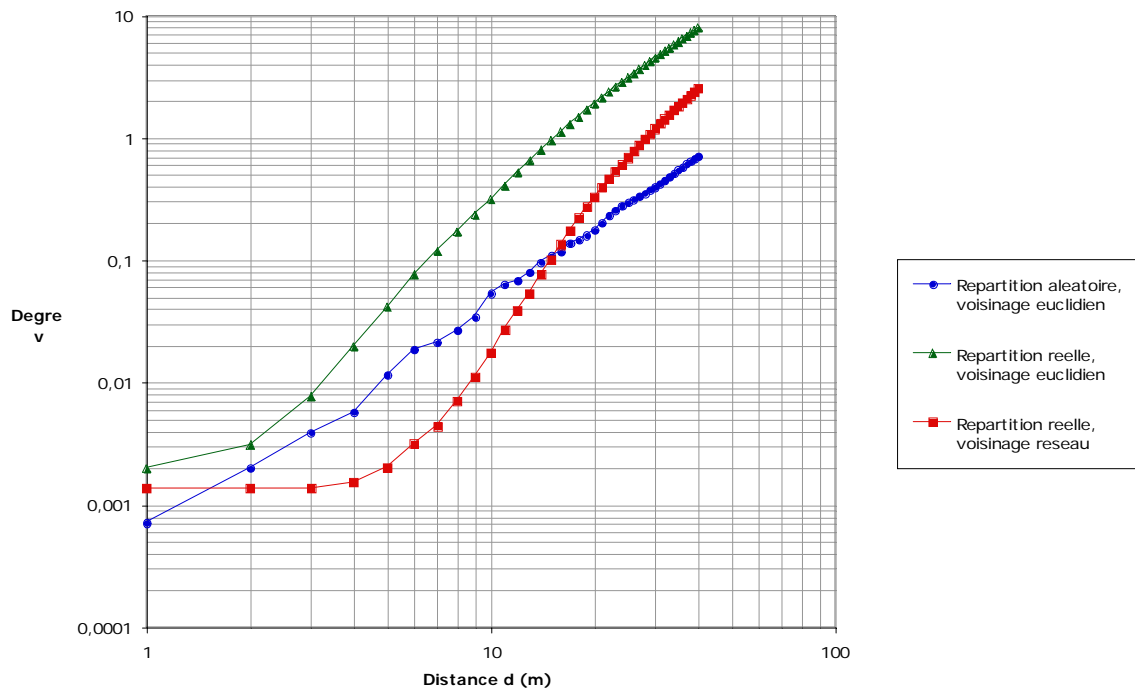
**Figure 1.** (a) Graphe urbain  $G(S,A)$ , (b) graphe fonctionnel  $G'(U,K)$  et (c) graphe de voisinage par le réseau  $G_t''(U,R)$ .

## 4 Les discontinuités morphologiques observées

Le procédé de construction de graphes énoncé a été appliqué à la base de données cadastrales de l'agglomération Pau-Pyrénées. Afin d'étudier les différents graphes de voisinage de l'agglomération paloise générés, le degré moyen  $\nu$  (nombre moyen de voisins de chaque bâtiment à une distance donnée) a été choisi comme indicateur de leur structure. Ces résultats ont été comparés avec les structures des graphes de voisinage à métrique euclidienne créés, l'un à partir d'une répartition aléatoire, l'autre à partir de la répartition réelle des bâtiments de l'agglomération. La Figure 2 montre la capacité de chaque type de structure à intégrer des voisins au fur et à mesure que la distance seuil augmente.

On constate que la répartition réelle du bâti intègre plus facilement les voisins que la répartition aléatoire. Le caractère profondément organisé de la ville apparaît de façon évidente : la répartition des immeubles dans la réalité a un effet hiérarchisant qui tend à rapprocher les immeubles en ville.

D'autre part, le voisinage réseau intègre plus difficilement les voisinages à de faibles distances que le voisinage euclidien dans le cas de la répartition réelle des bâtiments de l'agglomération paloise, mais il les intègre plus facilement pour des distances supérieures à 15 m. Les voisins auraient donc tendance à « s'éloigner » de leurs voisins les plus proches, tout en essayant de rester fortement connectés à un niveau intermédiaire et/ou global.



**Figure 2.** Comparaison du degré moyen du graphe de voisinage réseautique de l'agglomération Pau-Pyrénées avec celui de graphes de voisinage euclidien pour des répartitions réelle et aléatoire, en fonction de la distance seuil.

Dans une répartition aléatoire on peut s'attendre à ce que le nombre de voisins d'un point donné varie en fonction non pas du rayon  $d$  mais de la surface  $\pi d^2$  du cercle dont il est le centre. En ajustant chacune de ces courbes par une fonction puissance :

$$v = k d^\alpha \quad (2)$$

$v$  : degré moyen

$d$  : distance seuil

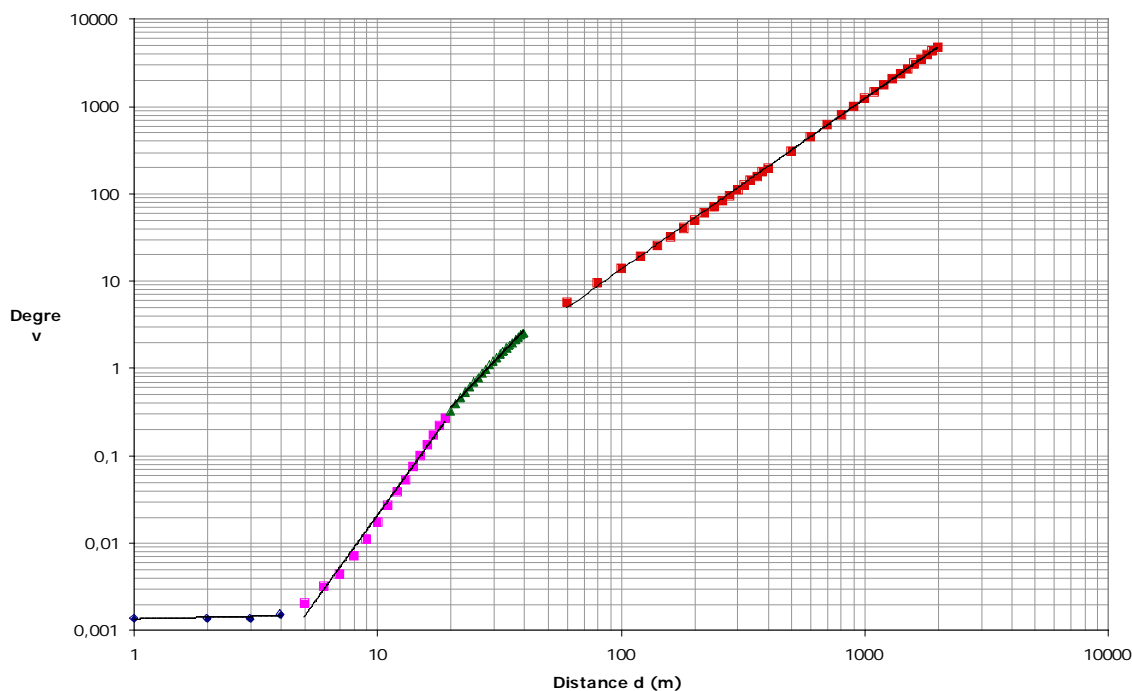
$k, \alpha$  : paramètres d'ajustement

on constate que, pour la situation de référence (répartition aléatoire et voisinage euclidien), la valeur du paramètre  $\alpha$  n'est pas très éloignée de 2. Dans d'autres travaux d'analyse radiale [4], cette valeur est considérée comme la dimension fractale du semis aléatoire. Mais l'introduction d'une métrique réseau nous place par définition dans un espace non euclidien, au sein duquel l'inégalité triangulaire  $d_{ij} < d_{ik} + d_{kj}$  ne se vérifie plus et où les distances ne

sont plus ni stationnaires ni isotropes. Dans le cas d'un voisinage réseau, le nombre de voisins devrait être proportionnel à la surface drainée. Or, lorsque l'on considère la répartition réelle du bâti, on constate le caractère non-linéaire des courbes. Il n'est donc pas possible d'énoncer une loi fractale unique des voisinages réseau.

La Figure 3, qui reprend le nombre de voisins par le réseau jusqu'à une distance de 2 km, montre bien qu'il existe quatre intervalles à comportement distinct dans le cas de l'agglomération Pau-Pyrénées :

1. En deçà de 5 m, l'intégration de voisins se fait très rarement, lorsque les accès à des bâtiments connexes dans la vieille ville sont très rapprochés.
2. Entre 5 et 20 m, les centres de Pau et des communes environnantes commencent à s'interconnecter autour de quelques carrefours de manière hiérarchisée, ce qui conduit à une accélération de l'intégration de voisins.
3. Entre 20 et 40 m, la croissance s'infléchit un peu, car la plupart des voisinages autour de carrefours centraux sont déjà intégrés, et des voisinages plus larges s'intègrent dans les quartiers excentrés à tissus plus lâches.
4. Au delà de 40 m, la croissance de la courbe s'infléchit à nouveau et des nouveaux bâtiments sont intégrés de manière progressive. Cela correspond à des maisons individuelles de taille moyenne, fortement présentes dans l'agglomération, des immeubles collectifs, de grandes villas, ou même des bâtiments industriels et commerciaux.



**Figure 3.** Identification de seuils et ajustements locaux de la relation entre la distance et le voisinage réseau dans l'agglomération Pau-Pyrénées.

Ces phases correspondent à des morphologies particulières, caractéristiques de l'agglomération Pau-Pyrénées, mais identifiables dans d'autres centres urbains. Elles correspondent aussi à des seuils qui traduisent bien les discontinuités locales dans la morphologie urbaine. Entre ces seuils des ajustements mathématiques sont possibles. Le Tableau 1 présente les différentes valeurs des paramètres obtenus par corrélation dans les intervalles cités.

La valeur du paramètre  $\alpha$  proche de 2 pour des distances supérieures à 40 m est singulière : on retrouve un comportement similaire à celui de la métrique euclidienne dans une répartition aléatoire. Le réseau palois permet donc, au-delà de 40 m, une mise en relation des lieux telle que le nombre moyen de voisins connectés croît en fonction du carré de la distance réseau.

Distance	$\alpha$	$\beta$	$R^2$
$0 < d < 5$ m	0,06	-2,87	0,430
$5 \text{ m} < d < 20$ m	3,79	-5,49	0,988
$20 \text{ m} < d < 40$ m	3,02	-4,40	0,996
$40 \text{ m} < d < 2000$ m	1,96	-2,79	0,999

**Tableau 1.** Paramètres d'ajustement des régressions logarithmiques de la Fig. 3.

## 5 Configurations urbaines et catastrophes

Rappelons que pour René Thom, une catastrophe est un changement brutal dans la dynamique d'un système qui permet au système de subsister alors qu'il devrait cesser d'exister [5].

La stabilité du système urbain a souvent été mise en question. La fin de la ville proviendrait d'une déstabilisation des interactions spatiales. Les infrastructures de transport entraînent souvent la déstructuration d'un tissu préexistant et peuvent contribuer à la diminution de l'intégration sociale [6]. Dans ce sens-là, l'apparition de l'habitat discontinu, individuel ou de style corbuséen [7] ou encore apparition des modes de locomotion individuels motorisés qui ont fait éclater la ville traditionnelle [8] constituent des catastrophes qui ont scandé l'histoire de la ville. Les hétérogénéités structurelles des tissus urbains décelées dans cette étude sont une traduction morphologique de ces catastrophes.

A l'inverse, pour d'autres auteurs, le phénomène urbain est irréversible et le système urbain devrait s'adapter à de nouvelles formes d'interaction qui dépassent la proximité spatiale. De nouvelles configurations spatiales catastrophiques devraient marquer le futur de la ville, afin que le système retrouve un nouvel équilibre dans de nouvelles formes.



La ville reste un espace où la société atteint son niveau d'organisation le plus complexe et qui doit assurer à l'individu une protection et un confort maximisés. Or, la croissance démographique urbaine, la diversification fonctionnelle à l'intérieur de la ville et la complexité croissante de ses installations augmentent l'exposition de la population aux risques naturels et technologiques [9]. Des configurations morphologiques vulnérables où se concentrent les relations de proximité doivent donc être identifiées pour la prévention et la gestion des catastrophes, au sens courant.

Les automates cellulaires offrent un cadre méthodologique vaste pour l'aménagement et la planification urbaine [10]. Or, l'hétérogénéité de l'espace est rarement prise en compte dans ces modèles, du fait de leur difficulté à représenter des morphologies irrégulières. O'Sullivan [11] a démontré que la simulation des processus spatiaux dans les automates cellulaires est très sensible à des petites modifications des structures spatiales et qu'un examen de leur formalisme est nécessaire. La représentation de la structure urbaine par graphes mathématiques exposée précédemment permet de dépasser la stationnarité des automates géographiques.

L'intégration des voisinages réseau dans des automates graphe-cellulaires [12] permet de simuler des processus urbains comme la diffusion, l'étalement ou la ségrégation spatiale [3]. A travers ce formalisme il est possible d'étudier comment les singularités présentes dans la structure spatiale ont une influence sur les dynamiques urbaines, afin d'effectuer un lien nécessaire entre l'application des systèmes distribués aux problématiques urbaines et la théorie des bifurcations.

## **6 Conclusion**

La modélisation des voisinages en milieu urbain avec le formalisme des graphes mathématiques offre de grandes possibilités à exploiter dans le futur. Le modèle Remus permet de réduire la complexité de l'espace urbain à l'aide de différents graphes qui représentent chacun de différents niveaux d'abstraction dans la représentation de la ville.

L'étude des graphes ainsi générés est une manière performante d'explorer les relations de proximité en milieu urbain. L'analyse du nombre de voisins en fonction de la distance par le réseau met en évidence le caractère organisé de la ville et les différentes morphologies qui la constituent. Il est donc possible de retracer les différentes étapes qui ont marqué l'évolution de la ville et de les mettre en relation avec son fonctionnement actuel.

Pour mener plus loin la réflexion, il est nécessaire d'établir la relation existante entre la morphologie urbaine et la dynamique des processus qui ont lieu à l'intérieur de la ville. Cela ouvre voie à de nouvelles perspectives de recherche, comme l'établissement d'une correspondance entre les catastrophes morphologiques qui caractérisent la ville et les phénomènes catastrophiques.

## 7 Références

- [1] Kaufmann A. *Des points et des flèches... La théorie des graphes*. Paris, Dunod, 1968, 155 p.
- [2] Floyd R.W., « Algorithm 97: Shortest Path ». *Communications of the ACM*, vol.5, n°6, 1962, p. 345.
- [3] Badariotti D., Banos A., Moreno D. *Modélisation de la structure spatiale urbaine par un automate cellulaire non stationnaire : le modèle Rémus*. colloque Sageo, Strasbourg, 2006, 16 p.
- [4] Kanevski M., Maignan M. *Analysis And Modelling Of Spatial Environmental Data*, EPFL Press, Lausanne, 2004, 300 p.
- [5] Thom R. *Modèles mathématiques de la morphogenèse*. Christian Bourgois éditeur, Paris, 1980, 314 p.
- [6] Bailly A., Pellegrino P., Hüsler W., Ruegg J. *Grandes infrastructures de transports, forme urbaine et qualité de vie. Le cas de Genève et de Zurich*. Ed. Economica, Paris, 2001.
- [7] Duby G. *Histoire de la France urbaine*. Paris, ed. du Seuil, 5 tomes, 1980 - 1985.
- [8] Wiel M. *La transition urbaine* Paris, Mardaga, 1999.
- [9] Asté J-P. « Géomatique et gestion des risques urbains », dans *Gestion spatiale des risques*. Gérard Brugnot, Lavoisier, collection Hermes Science, Paris, 2001, 287 p.
- [10] Benenson I, Torrens P. *Geosimulation: Automata-based modeling of urban phenomena*. John Wiley & Sons, 2004, 287 p.
- [11] O'Sullivan D. Graph-based cellular automata models of urban spatial processes. Thèse de doctorat, University College of London, Londres, 2000.
- [12] O'Sullivan D. « Graph-cellular automata: a generalised discrete urban and regional model », *Geographical Analysis*, vol.33, n°1, 2001.