

# Espace et complexités des systèmes territoriaux

## *Actes des Journées de Rochebrune 2019*

JUSTE RAIMBAULT<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> UPS CNRS 3611 ISC-PIF

<sup>2</sup> UMR CNRS 8504 Géographie-cités

### Résumé

Le caractère spatialisé des systèmes territoriaux joue un rôle déterminant dans l'émergence de leurs complexités. Cette contribution vise à illustrer dans quelle mesure différents types de complexités peuvent se manifester dans des modèles de tels systèmes.

**Keywords :** *Complexités ; Systèmes territoriaux ; Morphogenèse urbaine ; Co-évolution*

## 1 Introduction

Les systèmes territoriaux, qui peuvent être compris comme des structures socio-spatiales auto-organisées, sont une illustration typique de systèmes complexes étudiés sous de nombreux angles incluant plus ou moins l'aspect spatial de ces systèmes. Cette contribution vise à illustrer une approche de ceux-ci par la géographie urbaine, et dans quelle mesure leur complexité est intimement liée à leur caractère spatial.

Notre appréhension des systèmes territoriaux se place plus particulièrement dans la lignée de la théorie évolutive des villes (Pumain, 1997) qui comprend les systèmes urbains comme des systèmes multi-niveaux, dans lesquels la co-évolution des multiples composants et agents détermine la dynamique de ceux-ci (Raimbault, 2018b).

Le concept de complexité correspond à de diverses approches et définitions (Chu, 2008; Deffuant et al., 2015). Un précédent travail par Raimbault (2018d) s'était proposé de suggérer des ponts épistémologiques entre différentes approches et définitions de la complexité

Nous tâchons ici d'illustrer les liens entre complexité et espace selon différentes vues de celle-ci, à la fois à travers des considérations théoriques mais aussi par l'exploration de modèles de simulation de systèmes territoriaux.

## 2 Complexité ontologique

### 2.1 Multidimensionalité et diversité d'approches

Une première entrée théorique permet une entrée sur ce que nous appelons *complexité ontologique*, qui a été proposée par Pumain (2003) comme la largeur des points de vue disciplinaires nécessaires pour appréhender un même objet. La multidimensionalité des systèmes territoriaux reste un enjeu principal pour leur compréhension, comme l'illustre Perez et al. (2016) dans le cas des systèmes multi-agents.

Nous reprenons l'exemple de (Raimbault, 2017c) comme preuve-de-concept de la diversité des approches possibles dans le cas des relations entre réseaux et territoires, et suggérons des pistes de réflexion quant au rôle de l'espace dans cette complexité, comme les processus évolutifs de diversification ou de spécialisation liés aux niches spatiales.

## 2.2 L’espace porteur de richesse ontologique ?

À ce point, nous proposons une hypothèse, dont l’exploration empirique nécessiterait des analyses scientométriques poussées hors de portée de ce travail, selon laquelle une spatialisation plus élaborée serait liée à un éventail ontologique plus large.

## 3 Complexité dynamique

### 3.1 Systèmes dynamiques, chaos et fractales

La compréhension des systèmes complexes comme systèmes dynamiques aux attracteurs plus ou moins chaotiques a été largement développée en géographie (Dauphiné, 1995). Par exemple, Haken and Portugali (2016) considère que l’information sémantique d’un environnement urbain est liée aux attracteurs de systèmes dynamiques régissant les dynamiques de ses agents. Ce type d’approche peut par ailleurs être rapprochée des approches fractales des systèmes urbains, initialement introduites par Batty and Longley (1994), et par exemple plus récemment appliquées à des problèmes réels de planification urbaine Yamu and Frankhauser (2015).

SPatio temporal chaos Chen (2009) Crutchfield and Kaneko (1987) Chen (2009)

### 3.2 Non-ergodicité et sensibilité aux conditions initiales

Nous utilisons ici un modèle de morphogenèse urbaine introduit par Raimbault (2018a) pour illustrer les propriétés de non-ergodicité et de dépendance au chemin des systèmes territoriaux (Pumain, 2012).

En particulier, nous montrons la forte sensibilité des formes urbaines finales simulées aux perturbations spatiales, et plus généralement la dépendance au chemin des trajectoires pour les indicateurs morphologiques agrégés.

L’expérience menée par Raimbault (2018a) sur une version simplifiée à une dimension du modèle montre que les distributions semi-stationnaires de population peuvent être à distance maximale (au sens d’une norme L2 entre les distributions) à partir d’une même configuration initiale. En deux dimensions, le phénomène est identique. Nous montrons en Fig. 1 une estimation basique des exposants de Lyapounov à partir d’une configuration initiale sensible.

Par ailleurs, à partir de la même configuration initiale, nous illustrons les trajectoires temporelles des indicateurs morphologiques agrégés.

## 4 Complexité et co-évolution

### 4.1 Co-évolution dans les systèmes territoriaux

L’intrication forte des éléments présents au sein de ce qui peut être compris comme niches territoriales, au sens des niches écologiques de Holland (2012), est une expression d’une co-évolution et donc d’une complexité au sein de ces niches. Raimbault (2018c) montre l’existence empirique de ces niches spatiales dans le cas du système de villes français sur le temps long, ainsi que leur émergence au sein d’un modèle de co-évolution entre villes et réseaux de transport à l’échelle macroscopique.

### 4.2 Non-stationnarité spatiale et co-évolution

Nous explorons alors ici par des expériences de simulation le lien entre non-stationnarité spatiale, qui est également un marqueur de complexité spatiale, et émergence de niches au sein d’un modèle de morphogenèse hybride couplant développement urbain et réseau, introduit par Raimbault et al. (2014).

Le modèle RBD (Raimbault et al., 2014) couple de manière simple croissance urbaine et évolution du réseau viaire. La flexibilité des régimes qu’il permet de capturer fournit dans Raimbault (2017b) un test pour une méthode d’identification de causalités spatio-temporelles. Nous étendons ici cette méthode par une détection endogène des zones spatiales sur lesquelles sont estimées les corrélations, afin de montrer l’émergence de niches par la non-stationnarité.

Les niches territoriales sont détectées de la façon suivante :

1. Un réseau support est créé, avec des noeuds sur une grille de taille fixée ( $k = 5$ ) et une connexion aux 8 plus proches voisins.
2. Une distance entre chaque couple de noeud voisin est calculée par

$$d_{ij} = \sqrt{\sum_k (\tau_M^{(k)}(i) - \tau_M^{(k)}(j))^2}$$

3. Le poids des liens du réseau est donné par  $w_{ij} = \frac{1}{1+d_{ij}^p}$
4. Une détection de communautés (algorithme de Louvain) est effectuée dans le réseau pondéré correspondant
5. La distance entre la partition obtenue et la partition correspondant à la non-stationnarité est calculée par diversité moyenne des profils de communautés en termes d’appartenance aux communautés de la partition opposée.

## 5 Complexité et émergence

Notre dernière entrée s’intéresse à la complexité en tant qu’émergence faible de structures et autonomie des niveaux supérieurs (Bedau, 2002), de manière théorique. Nous rappelons le caractère intrinsèquement multi-échelle des systèmes territoriaux, qui se manifeste par exemple dans l’approche des villes comme systèmes au sein de systèmes de villes (Pumain (1997) enrichissant Berry (1964)). Par ailleurs, il existe une nécessité actuelle de production de modèles spatiaux l’intégrant effectivement (Rozenblat and Pumain, 2018), dans le but de modèles effectivement opérationnels.

La difficulté d’endogénéisation de niveau supérieurs autonomes peut par exemple être illustrée par Le Néchet and Raimbault (2015) qui propose un modèle de co-évolution entre transport et usage du sol à l’échelle métropolitaine intégrant une structure de gouvernance endogène pour le réseau de transport. Simulant les négociations entre acteurs locaux du transport, certains régimes conduisent à l’émergence d’un niveau intermédiaire de gouvernance issu de la collaboration entre acteurs voisins. Les trois niveaux décisionnels sont alors bien autonomes ontologiquement mais aussi en termes de dynamiques. L’émergence de la collaboration est finement liée à la structure spatiale, puisque les acteurs incluent les motifs d’accessibilité dans leur processus de prise de décision.

Des systèmes de complexité ontologique moindre présentent aussi un rôle crucial de l’émergence faible. L’état local d’un flux de trafic est en partie conséquence de l’état global du système, en particulier lorsque des motifs de congestion conséquents sont observables à l’échelle macroscopique. Dans ce cas, les motifs spatio-temporels sont encore cruciaux dans le processus d’émergence (Treiber et al., 2010).

## 6 Discussion

### 6.1 Perspectives

Diverses approches de la complexité que nous n’avons pu aborder peuvent être suggérées en perspective. Il pourrait par exemple exister un lien entre complexité computationnelle et caractère de grande déviation des configurations territoriales (impossibilité empirique en probabilité de les obtenir en force brute) : dans quelle mesure un système territorial est-il facile à générer par computation, et quelles propriétés peuvent expliquer cette possibilité ?

Il pourrait aussi être suggéré un lien entre complexité informationnelle et diffusion de l'innovation dans les systèmes territoriaux (Favaro and Pumain, 2011).

Nous suggérons finalement, suivant Raimbault (2017a), que les systèmes territoriaux sont nécessairement au croisement de multiples complexités, et ajoutons, d'après les divers exemples développés ici, que leur caractère spatial prend une place importante dans l'émergence de celles-ci.

## Références

- Batty, M. and Longley, P. A. (1994). *Fractal cities : a geometry of form and function*. Academic Press.
- Bedau, M. (2002). Downward causation and the autonomy of weak emergence. *Principia : an international journal of epistemology*, 6(1) :5–50.
- Berry, B. J. (1964). Cities as systems within systems of cities. *Papers in Regional Science*, 13(1) :147–163.
- Chen, Y. (2009). Urban gravity model based on cross-correlation function and fourier analyses of spatio-temporal process. *Chaos, Solitons & Fractals*, 41(2) :603–614.
- Chu, D. (2008). Criteria for conceptual and operational notions of complexity. *Artificial Life*, 14(3) :313–323.
- Crutchfield, J. P. and Kaneko, K. (1987). Phenomenology of spatio-temporal chaos. In *Directions In Chaos—Volume 1*, pages 272–353. World Scientific.
- Dauphiné, A. (1995). *Chaos, fractales et dynamiques en géographie*, volume 4. GIP Reclus.
- Deffuant, G., Banos, A., Chavalarias, D., Bertelle, C., Brodu, N., Jensen, P., Lesne, A., Müller, J.-P., Perrier, É., and Varenne, F. (2015). Visions de la complexité. le démon de laplace dans tous ses états. *Natures Sciences Sociétés*, 23(1) :42–53.
- Favaro, J.-M. and Pumain, D. (2011). Gibrat revisited : An urban growth model incorporating spatial interaction and innovation cycles. *Geographical Analysis*, 43(3) :261–286.
- Haken, H. and Portugali, J. (2016). Information and selforganization : A unifying approach and applications. *Entropy*, 18(6) :197.
- Holland, J. H. (2012). *Signals and boundaries : Building blocks for complex adaptive systems*. MIT Press.
- Le Néchet, F. and Raimbault, J. (2015). Modeling the emergence of metropolitan transport authority in a polycentric urban region. In *European Colloquium on Theoretical and Quantitative Geography*, Bari, Italy.
- Perez, P., Banos, A., and Pettit, C. (2016). Agent-based modelling for urban planning current limitations and future trends. In *International Workshop on Agent Based Modelling of Urban Systems*, pages 60–69. Springer.
- Pumain, D. (1997). Pour une théorie évolutive des villes. *Espace géographique*, 26(2) :119–134.
- Pumain, D. (2003). Une approche de la complexité en géographie. *Géocarrefour*, 78(1) :25–31.
- Pumain, D. (2012). Urban systems dynamics, urban growth and scaling laws : The question of ergodicity. In *Complexity Theories of Cities Have Come of Age*, pages 91–103. Springer.
- Raimbault, J. (2017a). Complexity, complexities and complex knowledges. In *ERC GeoDiverCity International Workshop-Theories and models of urbanization*.
- Raimbault, J. (2017b). Identification de causalités dans des données spatio-temporelles. In *Spatial Analysis and GEomatics 2017*.
- Raimbault, J. (2017c). Invisible bridges ? scientific landscapes around similar objects studied from economics and geography perspectives. In *20th European Colloquium in Theoretical and Quantitative Geography 2017*.
- Raimbault, J. (2018a). Calibration of a density-based model of urban morphogenesis. *PloS one*, 13(9) :e0203516.
- Raimbault, J. (2018b). *Caractérisation et modélisation de la co-évolution des réseaux de transport et des territoires*. PhD thesis, Université Paris 7 Denis Diderot.
- Raimbault, J. (2018c). Modeling the co-evolution of cities and networks. *Forthcoming in Handbook of cities and networks*, Rozenblat C., Niel Z., eds. *arXiv :1804.09430*.
- Raimbault, J. (2018d). Relating complexities for the reflexive study of complex systems. *arXiv preprint arXiv :1811.04270*.
- Raimbault, J., Banos, A., and Doursat, R. (2014). A hybrid network/grid model of urban morphogenesis

- and optimization. In *4th International Conference on Complex Systems and Applications (ICCSA 2014)*, pages 51–60. M. A. Aziz-Alaoui, C. Bertelle, X. Z. Liu, D. Olivier.
- Rozenblat, C. and Pumain, D. (2018). Conclusion : Toward a methodology for multi-scalar urban system policies. *International and Transnational Perspectives on Urban Systems*, page 385.
- Treiber, M., Kesting, A., and Helbing, D. (2010). Three-phase traffic theory and two-phase models with a fundamental diagram in the light of empirical stylized facts. *Transportation Research Part B : Methodological*, 44(8-9) :983–1000.
- Yamu, C. and Frankhauser, P. (2015). Spatial accessibility to amenities, natural areas and urban green spaces : using a multiscale, multifractal simulation model for managing urban sprawl. *Environment and Planning B : Planning and Design*, 42(6) :1054–1078.