

# Espace et complexités des systèmes territoriaux

## *Actes des Journées de Rochebrune 2019*

JUSTE RAIMBAULT<sup>1,2,3</sup>

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

<sup>2</sup> CASA, UCL

<sup>3</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. Nous développons d'un point de vue théorique des arguments illustrant la complexité ontologique, au sens de la multitude et multidimensionalité de représentations possibles, puis la complexité au sens de l'émergence, c'est-à-dire la nécessité de l'existence de plusieurs niveaux autonomes. Nous proposons ensuite des expériences numériques pour explorer des propriétés de la complexité (complexité dynamique et co-évolution) au sein de deux modèles simples de morphogenèse urbaine. Nous suggérons finalement d'autres dimensions de la complexité qui pourraient être typiques des systèmes territoriaux.

**Mots-clés :** *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, qui dépendent des domaines où elles sont introduites. Par exemple, Chu (2008) passe en revue les approches conceptuelles et opérationnelles liées au champ de la vie artificielle et montre qu'il n'existe pas de concept unifié. Deffuant et al. (2015) développe aussi différentes visions de la complexité, allant d'une complexité proche d'une complexité computationnelle à une complexité irréductible propre aux systèmes sociaux. Un précédent travail par Raimbault (2018d) s'était proposé de suggérer des ponts épistémologiques entre différentes approches et définitions de la complexité, et plus particulièrement les liens entre complexité au sens d'émergence, complexité computationnelle et complexité informationnelle. 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.

La suite de cet article est organisée de la façon suivante : dans deux premières sections nous développons une approche conceptuelle de la complexité ontologique et de l'émergence au sein des systèmes territoriaux. Nous présentons ensuite des résultats de simulation d'un modèle de morphogenèse urbaine exhibant des propriétés typiques de la complexité dynamique. Une autre expérience permet ensuite de montrer le lien entre complexité et co-évolution. Nous discutons finalement les implications de ces résultats et des développements possibles.

## 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. L’exemple de la *New Economic Geography* et de la géographie économique illustre ce cas Marchionni (2004) : la première approche, afin de déployer ses outils analytiques, impose un réductionnisme puissant sur l’espace (ligne ou cercle pour une grande partie des modèles) et sur les objets (agents représentatifs, homogénéité), tandis que la seconde favorisera des descriptions empiriques fidèles aux particularités géographiques. Il est difficile de dire si l’espace est plus riche parce que l’approche n’est pas réductionniste ou le contraire, qu’un espace riche augmente la portée ontologique. Prétendre un sens de causalité serait en fait contre-productif, et cette congruence confirme notre argument qu’une spatialisation élaborée des modèles des systèmes territoriaux va de pair avec une plus grande richesse ontologique.

Cette réflexion peut être poussée sur le plan méthodologique, au sein duquel on peut retrouver la tension entre précision du modèle et robustesse des résultats, notamment en comparant les modèles basés-agent et les modèles de systèmes dynamiques permettant un certain niveau de résolution analytique

exemple de la microsim Birkin and Clarke (2011)

## 3 Complexité et émergence

Notre deuxième entrée théorique 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).

## 4 Complexité dynamique

Dans cette section ainsi que la suivante, nous proposons d'utiliser des modèles de simulation de morphogenèse urbaine pour montrer de manière concrète d'autres complexités des systèmes territoriaux. Les modèles, détaillés par la suite, sont implémentés en Netlogo Wilensky (1999) et en scala, et explorés à l'aide du logiciel d'exploration de modèles OpenMOLE Reuillon et al. (2013). L'ensemble du code et des résultats est disponible de manière ouverte sur le dépôt git du projet à <https://github.com/JusteRaimbault/SpatialComplexity>. Les résultats de simulation sont disponibles à <https://doi.org/10.7910/DVN/LENFVH>.

### 4.1 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). Ces questions sont liées plus généralement à des problématiques transversales de chaos spatio-temporel (Crutchfield and Kaneko, 1987). La compréhension du lien entre temps et espace, et des dynamiques non-uniformes, non-stationnaires, non-ergodiques correspondantes, reste en construction sur les plans théoriques, méthodologique et empirique, et promet de nombreuses applications pour l'étude des systèmes territoriaux. Par exemple, Chen (2009) combine les corrélations croisées et l'analyse de Fourier pour étudier un modèle de gravité urbaine. Une direction de recherche importante dans ce cadre est la compréhension de la non-stationnarité des propriétés des systèmes territoriaux, et Raimbault (2018e) l'explore dans le cas de la morphologie urbaine et de la forme des réseaux.

### 4.2 Sensibilité aux conditions initiales et dépendance au chemin

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 particulièrement sensible, constituée de 4 centres initiaux de taille équivalente. Pour une grille de taille 100, 4 centres sont positionnés au milieu de chaque quadrant, avec un noyau exponentiel de population de la forme  $P_0 \cdot \exp(-r/r_0)$  avec  $P_0 = 100$  et  $r_0 = 5$ . Le modèle est alors simulé pour des valeurs données des paramètres d'agrégation  $\alpha$ , de diffusion  $\beta$ ,  $n_d$ , de croissance et population  $N_G, P_{max}$  (voir Raimbault (2018a)), et une réalisation de la distance entre configuration  $d(t)$  est calculée sur deux réalisations indépendantes des populations  $P_i^{(k)}(t)$ , comme  $d(t) = \|P^{(1)} - P^{(2)}\|$ .

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

## 5 Complexité et co-évolution

### 5.1 Co-évolution dans les systèmes territoriaux

Une certaine approche des systèmes complexes territoriaux privilégie le concept de co-évolution. L'intrication forte des éléments présents au sein de ce qui peut être compris comme niches territoriales, au sens des

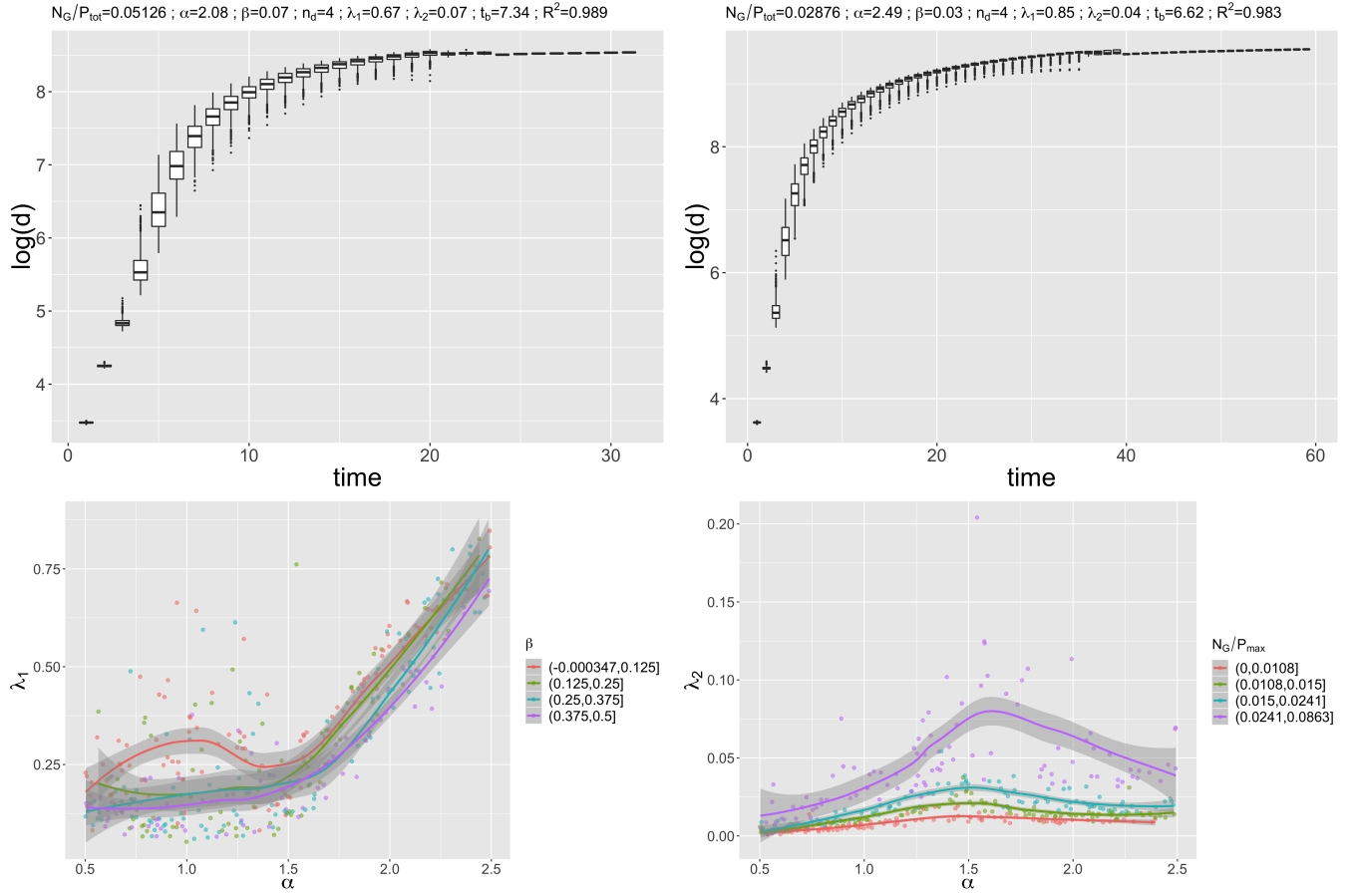


FIGURE 1 – Estimation des exposants de Lyapounov locaux pour le modèle de Réaction-diffusion.

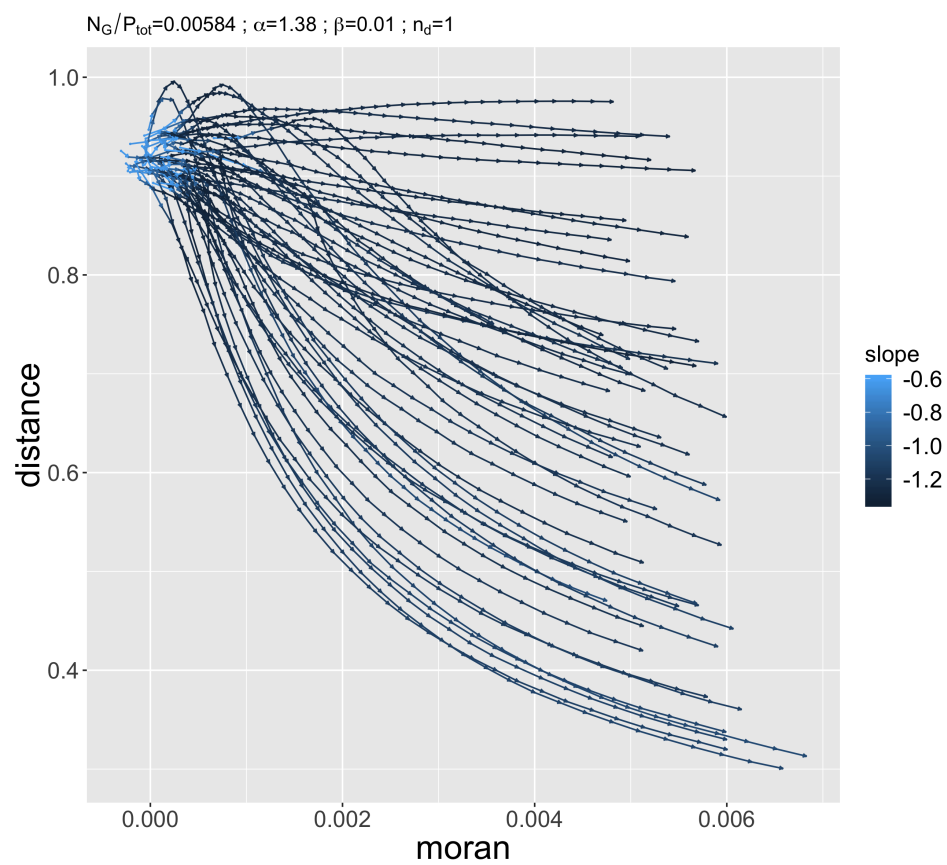


FIGURE 2 – Trajectoires temporelles des indicateurs morphologiques.

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.

## 5.2 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. Pour une description précise du modèle ainsi que son utilisation comme producteur de données synthétiques, se référer à Raimbault (2018b). Dans notre cas, les paramètres variables sont le nombre de centres initiaux  $N_C$  ainsi que les poids relatifs des différentes variables explicatives ( $w_c, w_r, w_d$ ) (distance au centre, distance au réseau, densité) régissant la valeur locale lors de l’étalement urbain.

La non-stationnarité est introduite en faisant ces derniers paramètres de poids dans l’espace. Nous distinguons deux implémentations, étant donné des valeurs attribuées à chaque centre : (i) la valeur locale des poids est donnée par celle du centre le plus proche ; (ii) la valeur locale est la moyenne des valeurs des centres pondérée par les distances à ceux-ci.

Les niches spatiales sont détectées par classification non-supervisée sur les profils de corrélation retardées estimées localement dans l’espace, c’est-à-dire  $(\rho_\tau [X_i, X_j])_{\tau, i, j}$  où  $-\tau_M \leq \tau \leq \tau_M$  avec  $\tau_M = 5$ . Les séries temporelles sont tronquées au dessous de  $t_0 = 5$  et à un point spatial donné, les corrélations sont estimées sur les cellules dans un rayon de  $r_0 = 10$ , avec un pas spatial de  $\delta x = 5$ . Un algorithme des k-means est utilisé pour classifier les profils, avec un nombre de clusters  $k = N_C$ . Pour supprimer la stochasticité de la classification, celle-ci est répétée  $b = 1000$  fois, et les mesures de performance sont estimées sur l’ensemble de ces réalisations de la classification.

Afin de quantifier la classification, une solution pourrait être d’étudier une distance à la partition définie par les zones de stationnarité. Cependant, la détermination d’une distance entre partitions est un problème NP-difficile (Day, 1981) dont même les solutions optimales (Porumbel et al., 2011) dépassent les capacités de calcul vu le nombre de réalisations. Nous utilisons donc les indicateurs suivants, capturant des propriétés attendues de niches spatiales : (i) distance cumulée entre les centroïdes de la classification et les centres, corrigée par la distance entre les centroïdes et celle entre les centres ; (ii) rayon normalisé moyen des clusters ; (iii) intersection spatiale moyenne entre clusters

## 5.3 Detection des niches territoriales

Il est important dans ce cas de noter des approches complémentaires pour la détection de niches spatiales, qui peuvent faire l’objet de développements futurs

## 6 Discussion

Diverses approches de la complexité que nous n’avons pu aborder peuvent être suggérées en perspective, comme étant également typique des systèmes territoriaux et pouvant être liées à l’espace.

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 ?

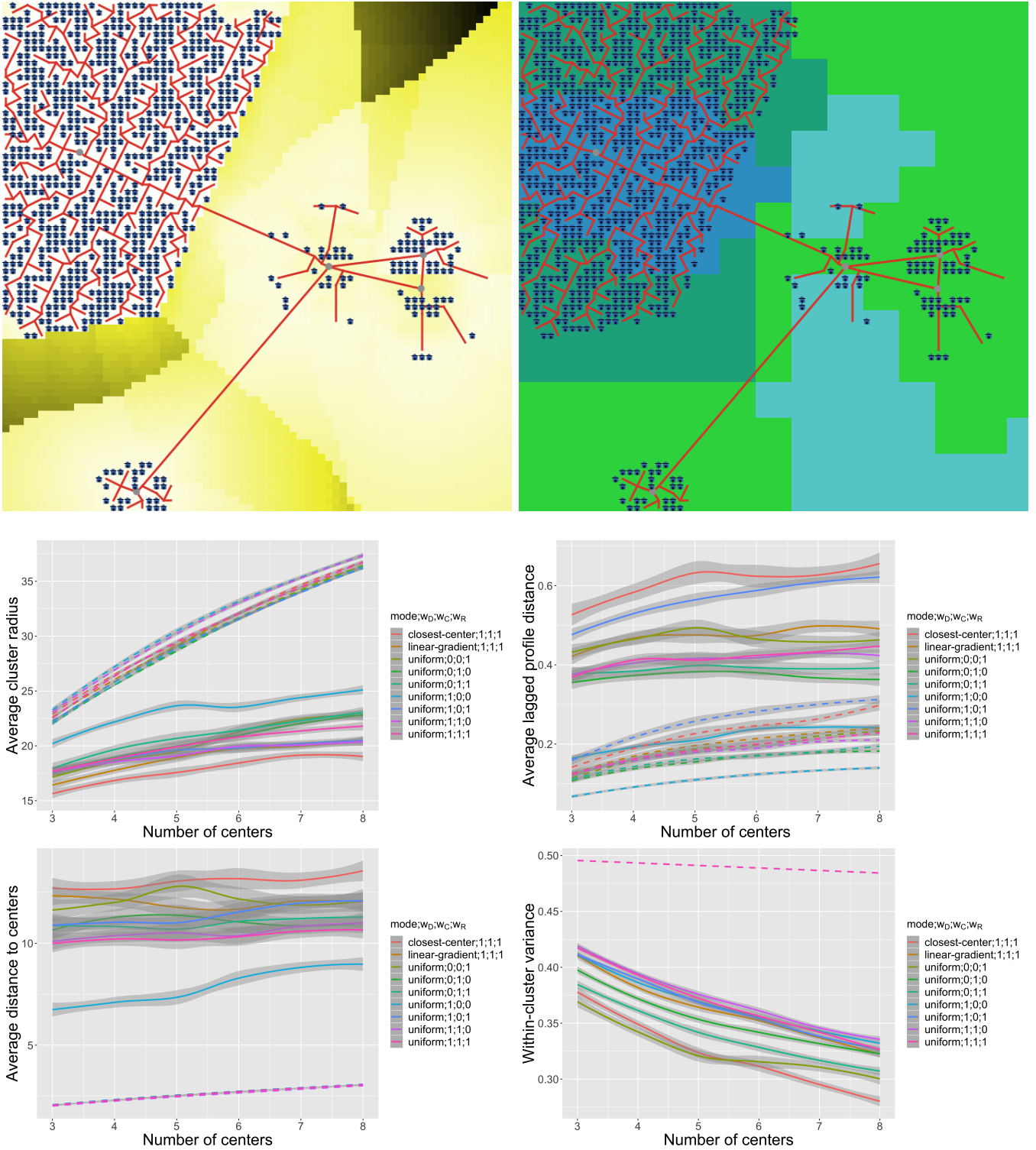


FIGURE 3 – **Niches spatiales de co-évolution dans le modèle RBD.** (*Haut gauche*) Configuration générée avec  $N_C = 5$  centres et des paramètres non-stationnaires par centre le plus proche, tels que, dans un ordre de coordonnée verticale décroissante, les poids pour chaque centre sont  $(w_d, w_r, w_c) = (0, 1, 0); (0, 0, 1); (1, 0, 1); (1, 0, 1); (0, 0, 1)$ ; (*Haut droite*) Exemple de réalisation correspondante pour la classification par k-means, la couleur de cellule donnant le cluster.; (*Milieu gauche*) Rayon normalisé moyen des clusters, pour chaque mode et configuration de paramètres (couleur), ainsi que pour le modèle nul de cluster aléatoire (lignes pointillées); (*Milieu droit*) Distance moyenne entre les profils de corrélations retardées pour les centroïdes des clusters; (*Bas gauche*) Distance moyenne des centroïdes aux centres; (*Bas droite*) Variance intra-cluster.

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.

## 7 Conclusion

## 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.
- Birkin, M. and Clarke, M. (2011). Spatial microsimulation models : a review and a glimpse into the future. In *Population dynamics and projection methods*, pages 193–208. Springer.
- 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.
- Day, W. H. (1981). The complexity of computing metric distances between partitions. *Mathematical Social Sciences*, 1(3) :269–287.
- 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.
- Marchionni, C. (2004). Geographical economics versus economic geography : towards a clarification of the dispute. *Environment and Planning A*, 36(10) :1737–1753.
- 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.
- Porumbel, D. C., Hao, J. K., and Kuntz, P. (2011). An efficient algorithm for computing the distance between close partitions. *Discrete Applied Mathematics*, 159(1) :53–59.
- 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. (2018e). An urban morphogenesis model capturing interactions between networks and territories. *Mathematics of Urban Morphogenesis*, D’acci L., ed., *Springer Birkhauser Mathematics*.
- 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.
- Reuillon, R., Leclaire, M., and Rey-Coyrehourcq, S. (2013). Openmole, a workflow engine specifically tailored for the distributed exploration of simulation models. *Future Generation Computer Systems*, 29(8) :1981–1990.
- 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.
- Wilensky, U. (1999). Netlogo.
- 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.