

Modeling interactions between transportation networks and territories : a co-evolution approach

Journée d'étude Pacte-Citeres 2018

JUSTE RAIMBAULT

(UPS CNRS 3611 ISC-PIF et UMR CNRS 8504 Géographie-cités)

Abstract

Interactions between transportation networks and territories are the subject of open scientific debates, in particular regarding the possible existence of structuring effects of networks, and linked to crucial practical issues of territorial development. We propose an entry on these through co-evolution, and more particularly by the modeling of co-evolution processes between transportation networks and territories. We construct a multi-disciplinary definition of co-evolution which is proper to territorial systems and which can be tested empirically. We then develop the lessons learnt from the development of two types of models, macroscopic interaction models in systems of cities and mesoscopic morphogenesis models through co-evolution. This research opens the perspective of multi-scale models that could be applied to territorial prospective.

Keywords : *Transportation networks ; territory ; co-evolution ; modeling*

1 Introduction

The potential effect of technical networks on territories, and more particularly of transportation networks, have fed scientific debates which remain relatively open in the current state-of-the-art, such as the issue of identifying of structuring effects of infrastructures (Offner, 1993). These can be observed on long time periods, but several works recall that caution is key regarding the contingency of each situation and the dangers of a political application of the concept (Offner et al., 2014).

A relevant approach to this question, explored by Raimbault (2018b) of which we do a short synthesis here, is to understand territories and transportation networks as co-evolving, i.e. exhibiting strongly coupled dynamics which are difficult to isolate (Bretagnolle, 2009). The construction of the concept of territory by Raimbault (2018b) at the intersection of Raffestin's approach and Pumain's approach, i.e. by combining the concept of human territory (Raffestin, 1987) with the one of territory as the space in which systems of cities are embedded (Pumain, 2018), shows that it implies potential relations between geographical objects, and by induction the emergence of technical networks through the realization of transactional projects (Dupuy, 1987). Therefore, the interaction between networks and territories can be intrinsically understood as endogenous to the concept of territory itself. We go further by postulating the potential existence of a *co-evolution* between transportation networks and territories, that we will define below from an interdisciplinary point of view in a dedicated section. We study more particularly in our work the *transportation networks*, in particular because these are typically representative of potentialities to shape territories that are attributed to technical networks, more specifically through the effective transportation of flows (Bavoux et al., 2005).

The research work we summarize proposes to explore this perspective of a co-evolution by studying it through the lens of modeling and simulation, considering the model as an instrument of knowledge in itself (Banos, 2013) complementary

to the theoretical and empirical aspects (Raimbault, 2017a), and which impact is amplified by the use of methods and tools for model exploration and intensive computation (Pumain and Reuillon, 2017). The use of generative simulation models for the considered systems allows to construct an indirect knowledge on implied processes and for example to directly test and compare hypothesis in this virtual laboratory (Epstein and Axtell, 1996).

Following Raimbault (2017c) which establishes a map of scientific approaches to the question, domains which studied the modeling of interactions between transportation networks and territories are much varied, from geography to planning of urban economics, and more recently physics, but these seem to be highly isolated (Raimbault, 2017d). According to a systematic literature review and a modelography done by Raimbault (2018b), and a typology of interaction processes, two scales appear as relevant to unveil the possible existence of co-evolution processes : the mesoscopic scale, which will typically be a metropolitan spatial scale, and the macroscopic scale, which corresponds to the scale of the system of cities.

Two complementary modeling directions corresponding to these two scales have thus been developed, extending the previous works modeling this co-evolution at the macroscopic (Baptiste, 2010; Schmitt, 2014) and mesoscopic (Raimbault et al., 2014) scale. These two axes correspond to different theoretical frameworks, namely the evolutive urban theory for the macroscopic (Pumain, 2018) and urban morphogenesis for the mesoscopic, which we understand as the emergent relation between form and function (Doursat et al., 2012).

This contribution aims at giving a synthesis of these research works, and is organized the following way : we firstly define the concept of co-evolution from a multi-disciplinary viewpoint. We then detail the results obtained for the modeling at the macroscopic scale, and then the ones for the mesoscopic scale. We finally discuss the perspectives opened and the future developments in the context of modeling co-evolution between transportation networks and territories.

2 Defining co-evolution

Transfer of concepts between disciplines is always difficult, and as co-evolution has been used by several disciplines, we propose here a definition inspired by the various ones in which it was developed.

A multi-disciplinary review and a more general definition not specific to territorial systems is developed in The detailed description of the different approaches is given in , of which we give here a broad overview.

Originating in biology, the concept of evolution requires typical features for a system to exhibit it (Durham, 1991), namely (i) transmission processes between agents ; (ii) transformation processes ; and (iii) isolation of sub-system such that differentiations emerge from the previous processes. Co-evolution then corresponds to entangled evolutionary changes in two species (Janzen, 1980). It was generalized to diffuse co-evolution by taking into account the broader context of numerous species in the ecological interaction network and of the environment (Strauss et al., 2005).

The concept was transferred to disciplines closer to social and human sciences, including the emerging field of cultural evolution Mesoudi (2017) for which building bricks of culture are transmitted and mutated, possibly with an interplay with biological evolution itself (Bull et al., 2000), but also sociology to interpret for example the interactions between social organizations as entities themselves (Volberda and Lewin, 2003). In the frame of evolutionary economics (Nelson and Winter, 2009), the concept was also largely applied in economic geography (Schamp, 2010), to investigate for example the link between economic clusters and knowledge spillovers (Wal and Boschma, 2011), the link between territories and technological innovation (Colletis, 2010), or environmental economics issues (Kallis, 2007).

2.1 Géographie

Pour la géographie, comme nous l'avons déjà présenté en introduction, les travaux les plus proches empiriquement et théoriquement des notions de co-évolution sont étroitement liés à la théorie évolutive des villes. Il n'est pas évident de tracer dans la littérature à quel moment la notion a été clairement formalisée, mais il est évident qu'elle était présente dès les fondements de la théorie (Pumain, 1997) : le système complexe adaptatif est composé de sous-systèmes en interdépendances complexes, souvent circulairement causales. Les premiers modèles incluent bien cette vision de manière implicite, mais la co-évolution n'est pas appuyée explicitement ou définie précisément, en termes qui seraient quantifiables ou identifiables structurellement. Paulus (2004) amène des indices empiriques de mécanismes de co-évolution par l'étude de l'évolution des profils économiques des villes françaises. L'interprétation utilisée par Schmitt (2014) repose sur une entrée par la théorie évolutive des villes, et consiste fondamentalement en une lecture des systèmes de villes comme entités fortement interdépendantes.

2.2 Synthèse

La plupart de ces approches rentrent dans la théorie des systèmes complexes adaptatifs développée par Holland (2012) : il voit tout système comme une imbrication de systèmes de limites, filtrant des signaux ou des objets. Au sein d'une limite donnée, le sous-système correspondant est relativement autonome de l'extérieur, est appelé *niche écologique*, en correspondance directe avec les communautés fortement connectées au sein des réseaux trophiques ou écologiques. Ainsi, des entités interdépendantes au sein d'une niche sont dites en co-évolution.

Nous retenons de cet aperçu multidisciplinaire de la co-évolution les points fondamentaux suivants précurseurs à une définition propre de la co-évolution.

1. La présence de *processus d'évolution* est primaire, et leur définition se ramène presque toujours à l'existence de processus de transmission et de transformation.
2. La co-évolution suppose des entités ou systèmes, appartenant à des classes distinctes, dont les dynamiques évolutives sont couplées de manière circulaire causale. Les approches peuvent différer selon l'hypothèse de populations de ces entités, d'objets singuliers, ou de composantes d'un système global alors en interdépendance mutuelle sans qu'il y ait circularité directe.
3. La délimitation des systèmes ou des sous-systèmes, à la fois dans l'espace ontologique (définition des objets étudiés), mais aussi dans l'espace et le temps, ainsi que leur distribution dans ces espaces, est fondamental pour l'existence de dynamiques co-évolutives, et a priori dans un grand nombre de cas, pour leur caractérisation empirique.

Nous proposons ainsi la définition suivante pour le cas spécifique des réseaux de transport et des territoires, qui fait écho au trois points essentiels (existence de processus évolutifs, définition des entités ou des populations, isolation de sous-systèmes dans le temps et l'espace) ci-dessous. Celle-ci vérifie les trois spécifications suivantes.

1. Dans un premier temps, les processus évolutifs correspondent aux transformations des composantes du système territorial aux différentes échelles : transformation sur le temps long des villes, de leurs réseaux, transmission entre villes des caractéristiques socio-économiques portées par les agents microscopiques mais aussi transmission culturelle, reproduction et transformation des agents eux-mêmes (firmes, ménages, opérateurs).
2. Ces processus évolutifs peuvent impliquer une co-évolution. Au sein d'un système territorial, pourront être en co-évolution à la fois : (i) des entités données (telle infrastructure et telles caractéristiques de tel territoire par

exemple, c'est-à-dire des individus), lorsque leur influence mutuelle sera circulairement causale (à l'échelle leur correspondant); (ii) des populations d'entités, ce qui se traduira par exemple par tel type d'infrastructure et telle composante territoriale co-évoluent au niveau statistique dans une région géographique donnée; (iii) l'ensemble des composantes d'un système à petite échelle géographique lorsqu'il existe de fortes interdépendances globales. Notre vision est donc fondamentalement *multi-échelles* et articule différentes significations à différentes échelles.

3. Enfin, la contrainte d'une isolation implique, en lien avec le point précédent, que la co-évolution et l'articulation des significations auront un sens s'il existe des isolations spatio-temporelles de sous-systèmes où s'effectuent les différentes co-évolutions, ce qui est en accord direct avec une vision en *Systèmes de systèmes multi-échelles*.

Notre définition est résolument ancrée dans une vision dynamique des processus, dans l'esprit initial de l'introduction du concept en biologie. L'ouverture sur les niveaux à laquelle co-évolution peut s'opérer permet une généralité mais aussi une précision et la mise en place de méthodes de caractérisation empiriques, comme celle introduite pour le deuxième niveau (co-évolution de population) par Raimbault (2017b). De plus, l'intégration implicite du concept de niche permet un accord avec la territorialité et sa déclinaison à plusieurs échelles dans des sous-systèmes territoriaux à la fois indépendants et interdépendants. Notre approche est plus générale que la notion de congruence proposée par Offner (1993), qui reste floue dans les relations d'interdépendance entre entités concernées, et pourrait être apparentée au troisième niveau d'interdépendances systémiques.

3 Macroscopic scale

The first modeling axis relates to the macroscopic scale and is based on the principles of the evolutionary urban theory (Pumain, 1997). The family of Simpop models is mainly situated in corresponding ontologies and scales, i.e. elementary entities constituted by cities themselves, at the spatial scale of the system of cities (regional to continental) and on relatively long time scales (longer than half a century) (Pumain, 2012).

3.1 Network effects

A first model that can be interpreted as a control, in which the network is static but has a retroaction on cities, indirectly suggests network effects. This preliminary work is detailed by Raimbault (2018c) which details the model and applies it to the French system of cities on a long time scale (1830-1999). The model is based on expected populations and captures complexity through non-linear interactions between cities, which are carried by the network. Three processes are added to determine the growth rate of cities : (i) an endogenous growth fixed by a parameter, corresponding to the Gibrat model ; (ii) direct interaction processes described as a gravity potential which influences the growth rate ; (iii) a retroaction of flows circulating in the network on the cities traversed. The model is initialized with real populations at the start of a period, and then evaluated by comparison to simulated populations on the full period, on two objectives which allow to take into account the adjustment of the total population or of their logarithm. The production of Pareto fronts shows that it is not possible to uniformly adjust the model for the full spectrum of city sizes. We show that the addition of the network component provides an effective increase in the adjustment, what suggests network effects.

3.2 Co-evolution model

This model is then extended to a co-evolutive model by Raimbault (2018d), in which cities and links of the transportation network are both dynamic and within a reciprocal dependency. This model is close to Schmitt (2014) for the rules of

population evolution, and to Baptiste (2010) for the evolution of the network. More precisely, it operates iteratively with the following steps : (i) population of cities evolve according the the specification of the static model described above ; (ii) the network evolves, following an abstract implementation such that distances between cities are updated with a self-reinforcement function depending on flows between each city, with a threshold parameter. This version of the model is strictly macroscopic and does not include the spatial form of the network since it updates the distance matrix only.

The systematic exploration of this model using the OpenMOLE software (Reuillon et al., 2013) and the application of an empirical method to characterize co-evolution (Raimbault, 2017b) allow us to show that it captures a large variety of coupled dynamics, including indeed co-evolutive dynamics : among the broad range of interaction regimes between network variables and population variables (in the sense of Raimbault (2017b), by classifying lagged correlation patterns), more than half of the regimes are effectively co-evolutive, i.e. exhibit circular causalities. This aspect could appear as trivial for a model conceived to integrate a co-evolution, but one has to realize that processes integrated in models are at the microscopic scale whereas the co-evolution is quantified at the macroscopic scale : it is indeed a property of the model to make co-evolution emerge. For example in the case of the SimpopNet model (Schmitt, 2014), Raimbault (2018f) shows that co-evolution regimes are much more rare and that this other model produces more often configurations of the type structuring effects or without any relation. Furthermore, the exploration unveils the existence of an optimal value for an interaction range parameter, at which the system exhibits a maximal complexity of city trajectories. This range correspond to the appearance of territorial niches, within which populations are co-evolving, corresponding to the third point of our definition.

La calibration sur le système de ville français sur la même durée que le modèle statique, avec données de population et réseaux ferroviaire dynamique pris en compte par matrices de distance dynamiques construite à partir des données de Thévenin et al. (2013), révèle des fronts de Pareto entre objectif pour la distance entre villes et objectif de population, suggérant une impossibilité de calibrer ce type de modèle simultanément pour la composante réseau et pour celle territoriale. Par ailleurs, l’ajustement pour la population est amélioré par ce modèle pour un certain nombre de périodes, par rapport au modèle avec réseau statique, suggérant la pertinence de la prise en compte des dynamiques co-évolutives. L’évolution du paramètre de seuil calibré suggère la capture d’un “effet TGV” par le modèle, c’est-à-dire l’amélioration de la distance effective pour les métropoles concernées mais une perte de vitesse pour les territoires laissés pour compte.

4 Echelle mesoscopique

Le deuxième axe, à l’échelle mesoscopique, considère l’entrée par la morphogenèse urbaine, comprise comme l’émergence simultanée de la forme et de la fonction d’un système (Doursat et al., 2012). Celle-ci permet de considérer une description plus fine des territoires, à l’échelle de grilles fines de population (résolution 500m) et de représentation vectorielle du réseau à la même échelle.

4.1 Morphogenèse par agrégation-diffusion

Les systèmes territoriaux produits sont quantifiés par indicateurs morphologiques pour la population (Le Néchet, 2015). Un premier modèle préliminaire, intégrant la population uniquement, montre que les processus d’agrégation et diffusion sont suffisant pour expliquer la grande majorité des formes urbaines existantes en Europe (Raimbault, 2018a). Ce résultat suggère que la prise en compte de la forme seule peut être effectuée de manière autonome, mais que les processus fonctionnels ne seront alors pas pris en compte au coeur des dynamiques. Afin d’appréhender les processus de morphogenèse, c’est-à-dire le lien fort entre forme et fonction lors de l’émergence de celles-ci, nous prenons le parti

d'utiliser le réseau de transport comme proxy des propriétés fonctionnelles des territoires, notamment par les propriétés de centralités. Cela nous amène à introduire un modèle de morphogenèse par co-évolution à l'échelle mesoscopique.

4.2 Morphogenèse par co-évolution

Les indicateurs de forme urbaine calculés sur fenêtres glissante de taille 50km pour l'ensemble de l'Europe sont complétés par des indicateurs structurels du réseau routiers, calculés à partir des données OpenStreetMap après un algorithme spécifique de simplification conservant les propriétés topologiques (Raimbault, 2018g). Ces indicateurs et leur corrélations spatiales statiques sont ainsi calculés sur des fenêtres de taille équivalente couvrant l'ensemble de l'Europe. Nous montrons par l'étude de la distribution spatiale de ces corrélations la non-stationnarité des processus d'interaction au second ordre, confirmant la pertinence de la notion de niche en tant que sous-système territorial cohérent.

Nous introduisons alors dans Raimbault (2018g) un modèle de morphogenèse capturant la co-évolution de la distribution spatiale de la population et du réseau routier. Ce modèle combine la logique de Raimbault (2018a) pour la complémentarité des processus d'agrégation et de diffusion à celle de Raimbault et al. (2014) pour la structure hybride en grille et réseau vectoriel ainsi l'influence de variables explicatives locales sur l'évolution territoriale. Ce modèle fonctionne de la façon suivante : (i) les propriétés morphologiques et fonctionnelles locales, intégrées comme variables explicatives locales normalisées (incluant population, distance au réseau, centralité de chemin, centralité de proximité, accessibilité), déterminent la valeur d'une fonction d'utilité à partir de laquelle est ajoutée la nouvelle population par attachement préférentiel, puis une diffusion des populations est effectuée ; (ii) le réseau routier évolue suivant des règles dépendant de différentes heuristiques (approche par multi-modélisation), qui incluent, après l'ajout de noeuds préférentiellement à la nouvelle population et leur connection directe au réseau existant, un ajout de liens par réseau aléatoire, rupture de potentiel aléatoire (Schmitt, 2014), rupture de potentiel déterministe (Raimbault, 2016), réseau biologique auto-organisé (Tero et al., 2010), compromis coût-bénéfices (Louf et al., 2013).

Le calcul d'indicateurs topologiques pour le réseau routier permet de calibrer le modèle, et Raimbault (2018e) montre que les différents processus de croissance de réseau qui ont été inclus suivant un processus de multi-modélisation sont complémentaires pour se rapprocher du maximum de configurations réelles en termes de réseau. Par ailleurs, le modèle est calibré simultanément sur indicateurs morphologiques, indicateurs topologiques, et leur matrices de corrélation, et les relativement faibles distances aux données pour un nombre non négligeable de points suggèrent que le modèle est capable de reproduire les résultats des processus au premier ordre (indicateurs) mais aussi au second ordre (interactions entre indicateurs). Concernant les régimes de causalité produits par le modèle, nous obtenons des configurations correspondant à une co-évolution, mais une diversité beaucoup plus faible que pour le modèle plus simple de Raimbault et al. (2014) qui a servi de modèle jouet pour la démonstration de la pertinence de la méthode des régimes de causalité dans Raimbault (2017b), suggérant une tension entre performance statique (reproduction des résultats des processus) et performance dynamique (reproduction des processus eux-mêmes) pour ce type de modèles.

4.3 Gouvernance des transports

Enfin, un dernier modèle métropolitain (modèle Lutecia) est décrit dans Raimbault (2018b), étendant celui proposé par (Le Néchet and Raimbault, 2015), explore le rôle des processus de gouvernance dans la croissance du réseau de transport, au sein d'un modèle de co-évolution. Ici, l'échelle métropolitaine correspond bien à celle mesoscopique. La collaboration entre acteurs locaux pour la construction des infrastructures de transport est prise en compte par l'intermédiaire de théorie des jeux. Cela permet de simuler l'émergence du réseau de transport et son interaction avec la forme urbaine quantifiée par les motifs spatiaux d'accessibilité. Ce modèle permet par exemple de montrer que les dynamiques co-évolutives peuvent

être amenées à inverser le comportement des gains d’accessibilité en comparaison à une configuration sans évolution de l’usage du sol, c’est-à-dire changer qualitativement le régime du système métropolitain. La calibration de ce modèle sur le cas stylisé de la méga-région urbaine du Delta de la Rivière des Perles en Chine permet d’extrapoler sur les processus de gouvernance, et suggère que la forme du réseau actuel est plus probablement due soit à des décisions totalement régionales soit totalement locales, mais pas de configuration intermédiaire, en contradiction avec la vision du contexte politique Chinois comme système de décision multi-niveau (Liao and Gaudin, 2017).

5 Perspectives

Cette recherche a ainsi développé des approches complémentaires à différentes échelles des interactions entre réseaux de transport et territoires en modélisant leur co-évolution. Nous détaillons finalement des perspectives de développement immédiats ouverts par ce travail.

5.1 Développements à l’échelle macroscopique

Nos modèles macroscopiques n’ont pas encore été testés sur d’autres systèmes urbains et d’autres étendues temporelles, et les développements futurs devront étudier quelles conclusions obtenues ici sont spécifiques au système de villes français sur ces périodes, et lesquelles sont plus générales et pourraient être plus génériques dans les systèmes de villes. L’application du modèle à d’autres systèmes de villes rappelle également la difficulté de définir les systèmes urbains. Dans notre cas, un fort biais doit être induit par le fait de considérer la France seule, puisque l’insertion de son système urbain dans un système européen est une réalité que nous avons dû négliger. L’étendue et l’échelle de tels modèles est toujours un sujet délicat. Nous reposons ici sur la cohérence administrative et celle de la base de données (Pumain and Riandey, 1986), mais la sensibilité à la définition du système et à son étendue doivent encore être testés.

Par ailleurs, la calibration a utilisé le réseau ferré uniquement pour les distances entre villes. La considération d’un seul mode de transport est bien sûr réductrice, et une direction immédiate de développement est le test du modèle avec des matrices de distance réelles pour d’autres types de réseaux, comme le réseau autoroutier qui a connu un essor considérable en France dans la seconde moitié du 20ème siècle. Cette application nécessite la mise en place d’une base dynamique pour la croissance du réseau autoroutier couvrant 1950 à 2015, les bases classiques (IGN ou OpenStreetMap) n’intégrant pas la date d’ouverture des tronçons. Une extension naturelle du modèle consisterait alors en la mise en place d’un réseau multi-couches, approche typique pour représenter des systèmes de transport multi-modaux (Gallotti and Barthelemy, 2014). Chaque couche du réseau de transport devrait avoir une dynamique co-évolutive avec les populations, avec possiblement l’existence d’une dynamique inter-couches.

5.2 Développements à l’échelle mesoscopique

La question du caractère générique du modèle de morphogenèse par co-évolution est également ouverte, c’est-à-dire s’il fonctionnerait de la même manière pour reproduire des formes urbaines sur des systèmes très différents comme les États-Unis ou la Chine. Un premier développement intéressant serait de le tester sur ces systèmes et à des échelles légèrement différentes (cellules de taille 1km par exemple).

Par ailleurs, le modèle Lutecia est également une contribution fondamentale vers la prise en compte de processus plus complexes impliqués dans la co-évolution, comme la gouvernance du système de transport. Ce modèle ouvre la porte à une nouvelle génération de modèles, pouvant être potentiellement opérationnels dans le cas de systèmes régionaux à très grande vitesse d’évolution comme dans le cas Chinois.

5.3 Vers des modèles multi-échelles

Notre travail ouvre enfin des perspectives d’approches intégrées, vers des modèles multi-échelles de ces interactions, qui s’avèrent de plus en plus nécessaires pour l’élaboration de modèles opérationnels pouvant être appliqués à l’élaboration de politiques de planification soutenables (Rozenblat and Pumain, 2018).

Une première entrée vers des modèles multi-scalaires est la prise en compte plus fine du réseau physique dans les modèles macroscopiques, qui est par exemple l’objet de Mimeur (2016), qui produit des résultats intéressants quant à l’influence de la centralisation de la décision d’investissement dans le réseau sur les formes finales, mais garde des populations statiques et ne produit pas de modèle de co-évolution. De même, le choix des indicateurs pour quantifier la distance du réseau simulé à un réseau réel est un problème délicat dans ce contexte : des indicateurs comme le nombre d’intersections pris par Mimeur (2016) relève de la modélisation procédurale et non d’indicateurs de structure. C’est probablement pour la même raison que Schmitt (2014) ne s’intéresse qu’aux trajectoires de population et pas aux indicateurs de réseau : la conjonction et l’ajustage des dynamiques de population et de réseau à des échelles différentes reste un problème ouvert.

Une seconde entrée consiste en l’intégration du modèle de morphogenèse mesoscopique au sein de population de modèles en interaction. Cette approche permettrait une prise en compte de la non-stationnarité des systèmes territoriaux que nous avons par ailleurs montré empiriquement. Ici à l’échelle mesoscopique, la population totale et le taux de croissance sont fixés par les conditions exogènes de processus se produisant à l’échelle macroscopique. C’est particulièrement le but des modèles spatiaux de croissance comme le modèle macroscopique introduit par ailleurs de déterminer de tels paramètres par les relations entre villes comme agents. Il serait alors possible de conditionner le développement morphologique de chaque zone aux valeurs des paramètres déterminés au niveau supérieur. Dans ce contexte, il faudrait être prudent sur le rôle de l’émergence : la forme urbaine émergente devrait-elle influencer le comportement macroscopique à son tour ? De tels modèles complexes multi-scalaires sont prometteurs mais doivent être considérés avec précaution pour le niveau de complexité requis et la manière de coupler les échelles.

6 Conclusion

Nous avons ici fait une synthèse des principaux résultats de Raimbault (2018b), confirmant la pertinence de l’approche par co-évolution dans l’appréhension des interactions entre réseaux de transport et territoires, en particulier pour la modélisation de ces interactions. Nous avons développé une définition précise de la co-évolution, par ailleurs associée à une méthode de caractérisation empirique. Les modèles à différentes échelles, et la perspective de modèles multi-échelles, pourront devenir des outils précieux de prospective territoriale dans le cadre des transitions durables sur le temps long, permettant de quantifier les systèmes territoriaux possibles et ceux souhaitables au regard de la soutenabilité, en prenant en compte des processus et des échelles relativement délaissés dans la littérature.

Références

- Banos, A. (2013). Pour des pratiques de modélisation et de simulation libérées en géographies et shs. *HDR. Université Paris*, 1.
- Baptiste, H. (2010). Modeling the evolution of a transport system and its impacts on a french urban system. *Graphs and Networks : Multilevel Modeling, Second Edition*, pages 67–89.
- Bavoux, J.-J., Beaucire, F., Chapelon, L., and Zembri, P. (2005). *Géographie des transports*. Paris : Armand Colin.

- Bretagnolle, A. (2009). *Villes et réseaux de transport : des interactions dans la longue durée, France, Europe, États-Unis*. Hdr, Université Panthéon-Sorbonne - Paris I.
- Bull, L., Holland, O., and Blackmore, S. (2000). On meme–gene coevolution. *Artificial life*, 6(3) :227–235.
- Colletis, G. (2010). Co-évolution des territoires et de la technologie : une perspective institutionnaliste. *Revue d'Économie Régionale & Urbaine*, (2) :235–249.
- Doursat, R., Sayama, H., and Michel, O. (2012). *Morphogenetic engineering : toward programmable complex systems*. Springer.
- Dupuy, G. (1987). Vers une théorie territoriale des réseaux : une application au transport urbain. In *Annales de Géographie*, pages 658–679. JSTOR.
- Durham, W. H. (1991). *Coevolution : Genes, culture, and human diversity*. Stanford University Press.
- Epstein, J. M. and Axtell, R. (1996). *Growing artificial societies : social science from the bottom up*. Brookings Institution Press.
- Gallotti, R. and Barthelemy, M. (2014). Anatomy and efficiency of urban multimodal mobility. *Scientific reports*, 4.
- Holland, J. H. (2012). *Signals and boundaries : Building blocks for complex adaptive systems*. MIT Press.
- Janzen, D. H. (1980). When is it coevolution. *Evolution*, 34(3) :611–612.
- Kallis, G. (2007). When is it coevolution? *Ecological Economics*, 62(1) :1–6.
- Le Néchet, F. (2015). De la forme urbaine à la structure métropolitaine : une typologie de la configuration interne des densités pour les principales métropoles européennes de l'audit urbain. *Cybergeo : European Journal of Geography*.
- 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.
- Liao, L. and Gaudin, J. P. (2017). L'ouverture au marché en chine (années 1980-2000) et le développement économique local : une forme de gouvernance multi-niveaux? *Cybergeo : European Journal of Geography*.
- Louf, R., Jensen, P., and Barthelemy, M. (2013). Emergence of hierarchy in cost-driven growth of spatial networks. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(22) :8824–8829.
- Mesoudi, A. (2017). Pursuing darwin's curious parallel : Prospects for a science of cultural evolution. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114(30) :7853–7860.
- Mimeur, C. (2016). *The traces of speed between space and network*. PhD thesis, Université de Bourgogne Franche-Comté.
- Nelson, R. R. and Winter, S. G. (2009). *An evolutionary theory of economic change*. Harvard University Press.
- Offner, J.-M. (1993). Les "effets structurants" du transport : mythe politique, mystification scientifique. *Espace géographique*, 22(3) :233–242.
- Offner, J.-M., Beaucire, F., Delaplace, M., Frémont, A., Ninot, O., Bretagnolle, A., and Pumain, D. (2014). Les effets structurants des infrastructures de transport. *Espace Géographique*, (42) :p–51.
- Paulus, F. (2004). *Coévolution dans les systèmes de villes : croissance et spécialisation des aires urbaines françaises de 1950 à 2000*. PhD thesis, Université Panthéon-Sorbonne-Paris I.
- Pumain, D. (1997). Pour une théorie évolutive des villes. *Espace géographique*, 26(2) :119–134.
- Pumain, D. (2012). Multi-agent system modelling for urban systems : The series of simpop models. In *Agent-based models of geographical systems*, pages 721–738. Springer.
- Pumain, D. (2018). An evolutionary theory of urban systems. In *International and Transnational Perspectives on Urban Systems*, pages 3–18. Springer.
- Pumain, D. and Reuillon, R. (2017). *Urban Dynamics and Simulation Models*. Springer International.
- Pumain, D. and Riandey, B. (1986). Le fichier de l'ined : "urbanisation de la france". *Espace Populations Sociétés*, 11(2) :269–278.

- Raffestin, C. (1987). Repères pour une théorie de la territorialité humaine. *Cahier/Groupe Réseaux*, 3(7) :2–22.
- Raimbault, J. (2016). Génération de données synthétiques corrélées. In *Rochebrune 2016, Journées d'Etude sur les Systèmes Complexes Naturels et Artificiels*.
- Raimbault, J. (2017a). An applied knowledge framework to study complex systems. In *Complex Systems Design & Management*, pages 31–45.
- 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. (2017d). Models coupling urban growth and transportation network growth : An algorithmic systematic review approach. *Plurimondi*, 17.
- 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). Indirect evidence of network effects in a system of cities. *Environment and Planning B : Urban Analytics and City Science*, page 2399808318774335.
- Raimbault, J. (2018d). Modeling the co-evolution of cities and networks. *Forthcoming in Handbook of Cities and Networks*, Niel Z., Rozenblat C., eds. *arXiv :1804.09430*.
- Raimbault, J. (2018e). Multi-modeling the morphogenesis of transportation networks. In *Artificial Life Conference Proceedings*, pages 382–383. MIT Press.
- Raimbault, J. (2018f). Unveiling co-evolutionary patterns in systems of cities : a systematic exploration of the simpopnet model. *Forthcoming in Theories and Models of Urbanization*, Pumain D., ed. *arXiv :1809.00861*.
- Raimbault, J. (2018g). An urban morphogenesis model capturing interactions between networks and territories. *Forthcoming in Mathematics of Urban Morphogenesis*, D'acci L., ed., Springer Birkhauser Mathematics. *arXiv :1805.05195*.
- 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.
- 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.
- Schamp, E. W. (2010). 20 on the notion of co-evolution in economic geography. *The handbook of evolutionary economic geography*, page 432.
- Schmitt, C. (2014). *Modélisation de la dynamique des systèmes de peuplement : de SimpopLocal à SimpopNet*. PhD thesis, Paris 1.
- Strauss, S. Y., Sahli, H., and Conner, J. K. (2005). Toward a more trait-centered approach to diffuse (co) evolution. *New Phytologist*, 165(1) :81–90.
- Tero, A., Takagi, S., Saigusa, T., Ito, K., Bebber, D. P., Fricker, M. D., Yumiki, K., Kobayashi, R., and Nakagaki, T. (2010). Rules for biologically inspired adaptive network design. *Science*, 327(5964) :439–442.
- Thévenin, T., Schwartz, R., and Sapet, L. (2013). Mapping the distortions in time and space : The french railway network 1830–1930. *Historical Methods : A Journal of Quantitative and Interdisciplinary History*, 46(3) :134–143.
- Volberda, H. W. and Lewin, A. Y. (2003). Co-evolutionary dynamics within and between firms : From evolution to co-evolution. *Journal of management studies*, 40(8) :2111–2136.

Wal, A. L. J. T. and Boschma, R. (2011). Co-evolution of firms, industries and networks in space. *Regional Studies*, 45(7) :919–933.