

---

# Une méthode d'identification de causalités dans des données spatio-temporelles

Juste Raimbault<sup>1,2</sup>

1. UMR CNRS 8504 Géographie-cités

2. UMR-T 9403 IFSTTAR LVMT

*juste.raimbault@polytechnique.edu*

---

RÉSUMÉ. Résumé.

ABSTRACT. Abstract in English

MOTS-CLÉS : Quelques mots clés

KEYWORDS: En anglais

---

## 1. Introduction

L'étude des processus spatio-temporels fortement couplés implique la prise en compte d'intrications entre ceux-ci généralement difficiles à isoler. Essence même des approches par la complexité, ces interactions qui sont à l'origine du comportement émergent d'un système font sens comme objet d'étude en lui-même, et une séparation des processus paraît alors contradictoire avec une vision intégrée du système. Dans le cas des systèmes territoriaux, l'exemple des interactions entre réseaux de transport et territoires est une excellente allégorie de ce phénomène : des méthodes isolant les "effets structurants" d'une infrastructure développées dans les années 70 (Bonnafous, Plassard, 1974) se sont révélées par la suite de l'instrumentation politique et sans fondement empirique (Offner, 1993). Le débat est toujours d'actualité puisque la question se pose toujours par exemple pour la construction de lignes à grande vitesse (Crozet, Dumont, 2011). La réalité des processus territoriaux est en fait bien plus compliqué qu'une simple relation causale entre la mise en place d'une infrastructure et les retombées sur le développement local, mais correspond bien d'une *co-évolution* complexe (Bretagnolle, 2009). Sur le temps long et à grande échelle, certains effets de renforcement des dynamiques dans les systèmes de villes par l'insertion dans les réseaux, ont été mis en valeur par l'application de la Théorie Evolutive des Villes (L'Espace géographique, 2014), montrant que le démêlage est toutefois possible dans certains cas par une compréhension plus globale du système. A une autre échelle, toujours concernant les relations entre réseaux et territoires, on peut citer les liens entre pratiques de mobilité, également urbain et localisation des ressources dans un cadre métropolitain (Cerdeira, 2017) qui s'avèrent tout autant complexes. Ce type de problématique est bien sûr présent dans d'autres domaines : en Economie Géographique, l'exemple des liens entre innovation, impacts locaux de la connaissance et aggregation des agents économiques est une illustration typiques de processus économiques spatio-temporels présentant des causalités circulaires difficiles à démêler (Audreysch, Feldman, 1996). Des méthodes spécifiques sont introduites, comme l'utilisation d'instruments statistiques comme par (Aghion *et al.*, 2015) dans lequel l'origine géographique des membres du Bureau du Congrès américain attribuant les subventions locales est une bonne variable instrumentale pour lier caractère innovant et inégalités des plus haut salaires, et permet de montrer que la correlation significative entre les deux est en fait une causalité de l'innovation sur les inégalités.

Le couplage fort spatio-temporel implique généralement l'introduction de la notion de causalité, à laquelle la géographie s'est toujours intéressée : (Loi, 1985) montre que les questions fondamentales que se pose la géographie théorique récente (isolation des objets, lien entre espace et structures causales, etc.) étaient déjà présentes dans la géographie classique de Vidal. (Claval, 1985) critique d'ailleurs les nouveaux déterminismes ayant émergé, notamment celui proposé par certains tenants de l'analyse systémique : dans ses débuts, cette

approche héritait de la cybernétique et donc d'une vision réductionniste impliquant un déterminisme même dans une formulation probabiliste. Claval note que des travaux contemporains à son écriture devraient permettre de capturer la complexité qui fait la particularité des décisions humaines : l'école de Prigogine et la Théorie des Catastrophes de Thom. Ce point de vue est remarquablement visionnaire, puisque comme le rappelle Pumain dans (Pumain, 2003), le glissement de l'analyse des systèmes à l'auto-organisation puis à la complexité a été long et progressif, et ces travaux ont été fondamentaux pour le permettre. François Durand-Dastès résume cette situation plus récemment dans (Durand-Dastes, 2003), en appuyant l'importance des bifurcations et de la dépendance au chemin lors des instants initiaux de la constitution du système qu'il désigne par *systèmogenèse*. Ce type de dynamique complexe implique généralement une co-évolution des composantes du système, qu'on peut interpréter comme des causalité circulaires entre processus : la question de pouvoir les identifier est donc cruciale au regard de la notion de causalité pour la géographie complexe contemporaine.

Les régimes sous lesquels des identifications de causalité sont cohérentes ne sont pas identifiés de manière évidente. Ceux-ci dépendront des définition utilisées, de la même manière que les méthodes à disposition pour lesquelles nous pouvons donner quelques illustrations. (Liu *et al.*, 2011) propose la détection de relations spatio-temporelles entre perturbations des flots de trafic, introduisant une définition particulière de la causalité basé sur une correspondance de points extrêmes. Les algorithmes associés sont toutefois spécifiques et difficilement applicables à des types de systèmes différents. L'utilisation des correlations spatio-temporelles a été démontrée comme ayant dans certains cas un fort pouvoir prédictif pour les flots de traffic (Min, Wynter, 2011). Egale-lement dans le domaine des transports et de l'usage du sol, (Xie, Levinson, 2009) applique une analyse par causalité de Granger, qu'on pourra interpréter comme une corrélation retardée, pour montrer dans un cas particulier que la croissance du réseau induit le développement urbain et est elle-même tirée par des externalités comme les habitudes de mobilité. Les neurosciences ont développé de nombreuses méthodes répondant à des problématiques similaires. (Luo *et al.*, 2013) définit une causalité de Granger généralisée prenant en compte la non-stationnarité et s'appliquant à des régions abstraites issues d'imagerie fonctionnelle. Ce genre de méthode est également développée en Vision par Ordinateur, comme l'illustre (Ke *et al.*, 2007) qui exploite les correlations spatio-temporelles de formes et de flux dans des successions d'images pour classifier et reconnaître des actions. Les applications peuvent être très concrète comme la compression de fichier vidéos par extrapolation des vecteurs de mouvement (Chalidabhongse, Kuo, 1997). Dans l'ensemble de ces cas, l'étude des correlations spatio-temporelles rejoint les notions faibles de causalité vues précédemment. Cette contribution cherche à explorer la possibilité d'une méthode analogue pour des données spatio-temporelles présentant a priori des causalités circulaires complexes, et donc de tenter l'exercice d'équilibrisme de concilier un

certain niveau de simplicité et de caractère opérationnel à une prise en compte de la complexité. Nous introduisons ainsi une méthode d'analyse des corrélations spatio-temporelles similaire à une causalité de Granger estimée dans le temps et l'espace, dont la robustesse est démontrée systématiquement par l'application à un modèle de simulation complexe de morphogenèse urbaine et par l'isolation de régimes de causalités distincts dans l'espace des phases du modèle

La suite de cet article est organisée de la façon suivante : le cadre générique de la méthode proposée est décrit dans la section suivante. Nous l'appliquons ensuite à un jeu de données synthétiques afin de la valider partiellement et de tester ses potentialités, ce qui permet de l'appliquer ensuite au cas d'étude réel des réseaux de transport du Grand Paris. Nous discutons finalement la proximité avec d'autres méthodes existantes et des développements possibles.

## 2. Méthode

Nous décrivons ici une méthode générique, basée sur un test similaire à la causalité de Granger (), pour tenter d'identifier des relations causales dans des systèmes spatiaux. Soit  $X_j(\vec{x}, t)$  des processus aléatoires spatiaux unidimensionnels. Une réalisation d'un sous-système territorial est donnée par des ensembles de trajectoires pour chaque processus  $x_{i,j,t}$ . On suppose l'existence de fonctions de correspondance  $\Phi_{j_1,j_2}$  permettant de faire correspondre les réalisations de chaque composantes à un index unique (dans le cas le plus simple, on associera les variables sur les mêmes patches). Si  $\text{argmax}_{\tau} \hat{\rho}[x_{j_1}, x_{j_2}]$  est clairement défini , son signe donnera alors le sens de la causalité entre les composantes  $j_1$  et  $j_2$ .

## 3. Résultats

### 3.1. Données Synthétiques

Cette méthode doit dans un premier temps être testée et partiellement validée, ce que nous proposons de faire sur des données synthétiques. En écho à l'exemple des relations entre réseaux de transport et territoires qui a permis d'introduire notre problématique précédemment, nous proposons de générer des configurations urbaines stylisées dans lesquelles réseau et densité s'influencent mutuellement, et pour lesquelles les causalités ne sont pas évidents *a priori* étant donné les paramètres du modèle génératif.(Raimbault *et al.*, 2014) décrit et explore un modèle simple de morphogenèse urbaine (modèle RBD) répondant parfaitement à ces contraintes. En effet, les variables explicatives de la croissance urbaine, les processus d'extension du réseau et le couplage entre densité urbaine et réseau sont assez élémentaires. Cependant, hormis dans des cas extrêmes (distance au centre détermine valeur foncière uniquement, le réseau dépendra de manière causale de la densité, ou distance au réseau seule, la causalité devrait être inversée), les régimes mixtes n'exhibent pas de causalités

évidentes : c'est donc un parfait cas pour tester si la méthode est capable d'en détecter.

Nous utilisons une implémentation adaptée<sup>1</sup> du modèle initial, permettant de capturer les valeurs des variables étudiées pour chaque patch et à chaque pas de temps et de calculer les corrélations retardées entre variables au sein du modèle.

Nous explorons une grille de l'espace des paramètres du modèle RDB, faisant varier les paramètres de poids de la densité, de la distance au centre et de la distance au réseau, que l'on note respectivement  $(w_d, w_c, w_r)$ , dans  $[0; 1]$  avec un pas de 0.1. Les autres paramètres sont fixés à leur valeurs par défaut données dans l'article. Pour chaque valeur des paramètres, nous procédons à  $N = 100$  répétitions ce qui est suffisant pour une bonne convergence des indicateurs. Les explorations sont effectuées via le logiciel OpenMole (Reuillon *et al.*, 2013).

Nous calculons sur l'ensemble des patches les corrélations retardées entre les variables suivantes : densité locale, distance au centre et distance au réseau. Des regroupements par régimes peuvent se faire, lorsqu'un paramètre domine et impose le régime

### **3.2. Cas d'étude**

#### *3.2.1. Contexte*

Nous proposons une application sur un cas d'étude réel, toujours lié aux relations entre réseaux de transport et territoires.

(Damm *et al.*, 1980)

(STIF, 2010) projet arc express

(Beaucire, Drevelle, 2013) étude équilibrage est-ouest

(SDRIF, 2013) : SDRIF 2013

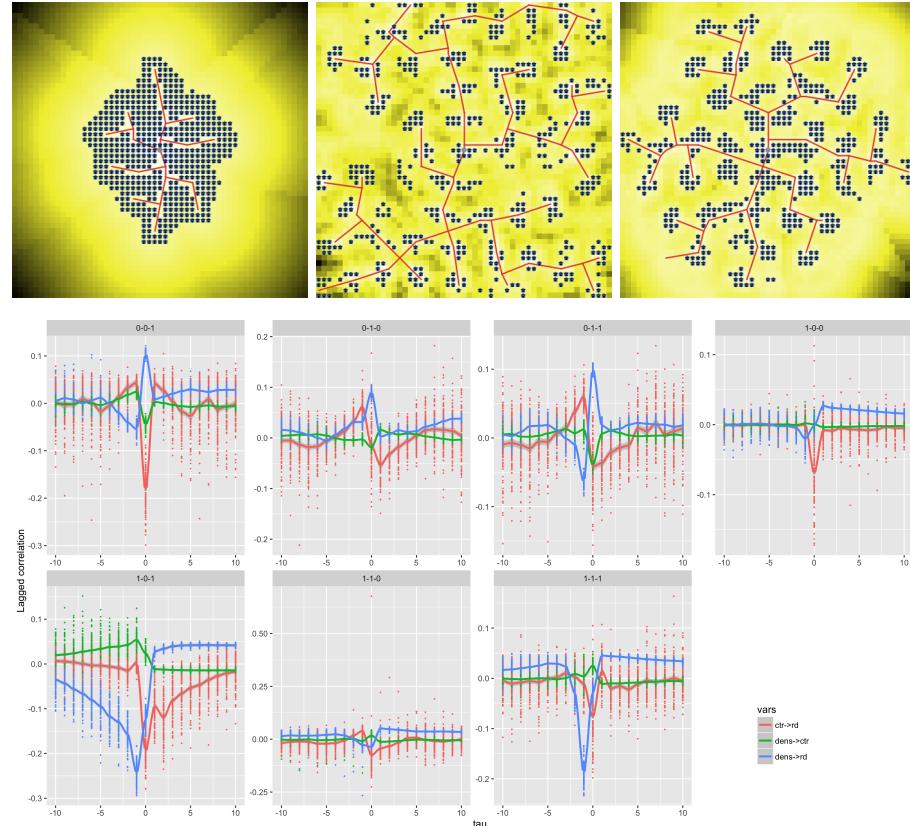
(Desjardins, 2010) bataille institutionnelle état-région

#### *3.2.2. Données*

Le nombre de transactions après nettoyage est de 862360, se répartissant sur l'ensemble des IRIS.

---

1. disponible sur le dépôt ouvert du projet à  
<https://github.com/JusteRaimbault/CityNetwork/tree/master/Models/Simple/ModelCA>

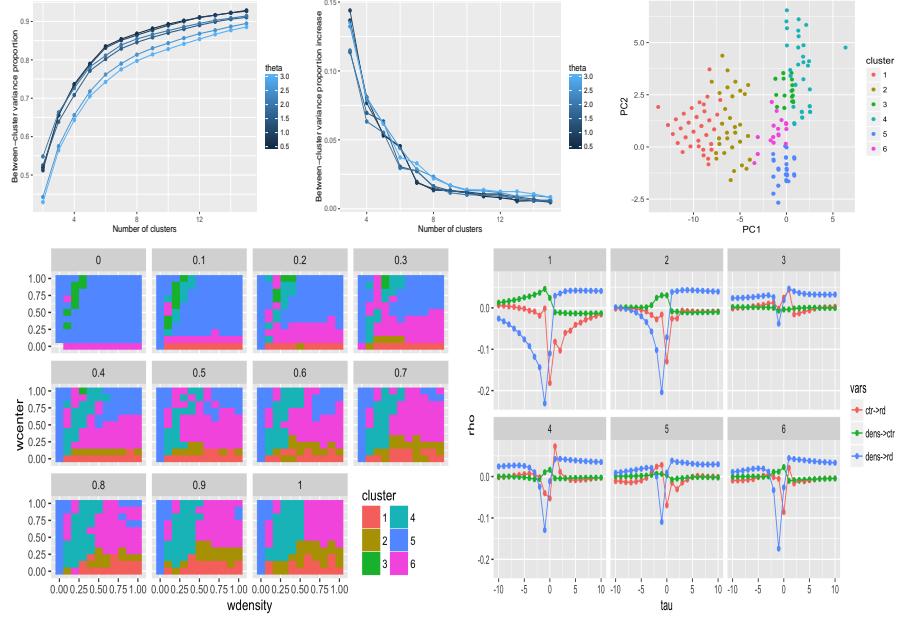


**FIGURE 1. Correlations dans le modèle RDB** (Première ligne) Exemples de configurations finales, obtenues avec  $(w_d, w_c, w_r)$  valant respectivement  $(0, 1, 1), (1, 0, 1)$ , et  $(1, 1, 1)$ . (Deuxième ligne) Corrélation retardées, pour chaque combinaison des paramètres, en fonction du retard  $\tau$ . Les différentes couleurs correspondent

### 3.2.3. Résultats

Le cas d'étude est implémenté en langage R (R Core Team, 2015) et l'ensemble des données, du code source et des résultats sont disponibles sur un dépôt git ouvert<sup>2</sup>.

2. A l'adresse <https://github.com/JusteRaimbault/CityNetwork/tree/master/Models/SpatioTempCausality/GrandParis>. Les données de la base BIEN ne sont fournies que de manière agrégée à l'IRIS et pour les variables de prix et de crédit, pour des raisons de fermeture contractuelle de la base brute.



**FIGURE 2. Identification de régimes d’interactions** (Haut Gauche) Variance inter-cluster comme fonction du nombre de clusters. (Haut Milieu) Dérivée de la variance inter-cluster. (Haut Droite) Features dans un plan principal. (Bas Gauche) Diagramme de phase des régimes dans l’espace ( $w_d, w_c, w_r$ ). (Bas Droite) Trajectoires correspondantes des centroides.

## 4. Discussion

### 4.1. Diffusion

STARMA, ondes, ergodicité etc.

### 4.2. Regression Géographique Pondérée

## 5. Conclusion

### Remerciements

Les résultats obtenus dans cet article ont été calculés sur l’organisation virtuelle vo.complex-system.eu de l’European Grid Infrastructure (<http://www.egi.eu>). Nous remercions l’European Grid Infrastructure et ses National Grid Initiatives

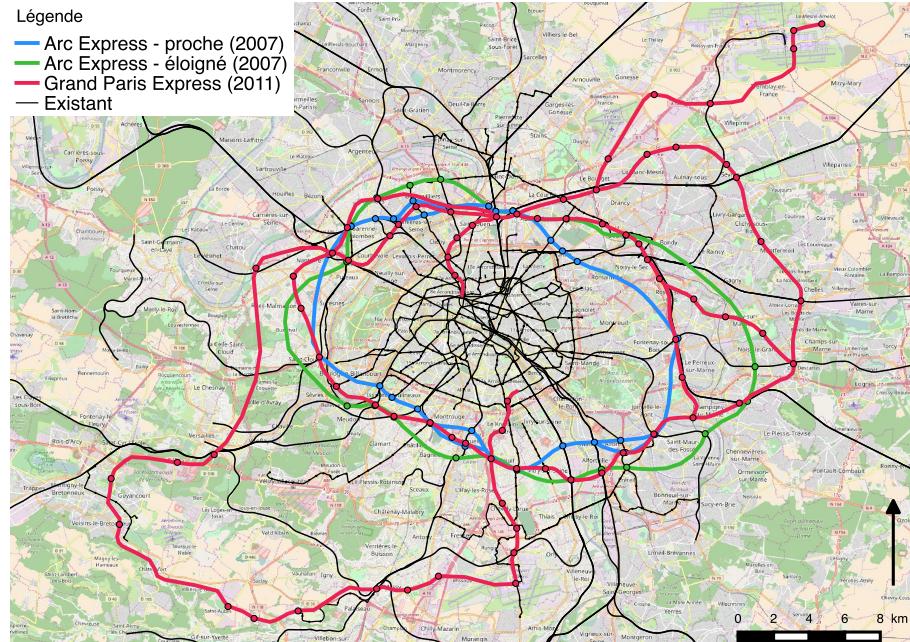


FIGURE 3. *Projets de transport successifs de la métropole du Grand Paris*

(France-Grilles en particulier) pour fournir le support technique et l'infrastructure.

## Bibliographie

- Aghion P., Akcigit U., Bergeaud A., Blundell R., Hémous D. (2015). *Innovation and top income inequality*. Rapport technique. National Bureau of Economic Research.
- Audretsch D. B., Feldman M. P. (1996). R&d spillovers and the geography of innovation and production. *The American economic review*, vol. 86, n° 3, p. 630–640.
- Beaucire F., Drevelle M. (2013). «grand paris express»: un projet au service de la réduction des inégalités d'accèsibilité entre l'ouest et l'est de la région urbaine de paris? *Revue d'Économie Régionale & Urbaine*, n° 3, p. 437–460.
- Bonafous A., Plassard F. (1974). Les méthodologies usuelles de l'étude des effets structurants de l'offre de transport. *Revue économique*, p. 208–232.
- Bretagnolle A. (2009). *Villes et réseaux de transport : des interactions dans la longue durée, France, Europe, États-Unis*. Hdr, Université Panthéon-Sorbonne - Paris I. Consulté sur <http://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00459720>

- Cerqueira E. V. (2017). Les inégalités d'accès aux ressources urbaines dans les franges périphériques de belo horizonte (brésil): quelles évolutions? *EchoGéo*, n° 39.
- Chalidabhongse J., Kuo C. J. (1997). Fast motion vector estimation using multiresolution-spatio-temporal correlations. *Circuits and Systems for Video Technology, IEEE Transactions on*, vol. 7, n° 3, p. 477–488.
- Claval P. (1985). Causalité et géographie. *Espace géographique*, vol. 14, n° 2, p. 109–115.
- Crozet Y., Dumont F. (2011). Retour sur les effets économiques du TGV. Les effets structurants sont un mythe (interview). *Ville, Rail et Transports*, n° 525, p. 48-51. Consulté sur <https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-01094554>
- Damm D., Lerman S. R., Lerner-Lam E., Young J. (1980). Response of urban real estate values in anticipation of the washington metro. *Journal of Transport Economics and Policy*, p. 315–336.
- Desjardins X. (2010). la bataille du grand paris. *L'Information géographique*, vol. 74, n° 4, p. 29–46.
- Durand-Dastes F. (2003). *Les géographes et la notion de causalité*. PUF.
- Ke Y., Sukthankar R., Hebert M. (2007). Spatio-temporal shape and flow correlation for action recognition. In *Computer vision and pattern recognition, 2007. cvpr'07. ieee conference on*, p. 1–8.
- L'Espace géographique. (2014). *Les effets structurants des infrastructures de transport, l'espace géographique 2014/1 (tome 43)*, p. 51-67.
- Liu W., Zheng Y., Chawla S., Yuan J., Xing X. (2011). Discovering spatio-temporal causal interactions in traffic data streams. In *Proceedings of the 17th acm sigkdd international conference on knowledge discovery and data mining*, p. 1010–1018.
- Loi D. (1985). Une étude de la causalité dans la géographie classique française.[l'exemple des premières thèses régionales]. *Espace géographique*, vol. 14, n° 2, p. 121–125.
- Luo Q., Lu W., Cheng W., Valdes-Sosa P. A., Wen X., Ding M. et al. (2013). Spatio-temporal granger causality: A new framework. *NeuroImage*, vol. 79, p. 241–263.
- Min W., Wynter L. (2011). Real-time road traffic prediction with spatio-temporal correlations. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol. 19, n° 4, p. 606–616.
- Offner J.-M. (1993). Les "effets structurants" du transport: mythe politique, mystification scientifique. *Espace géographique*, vol. 22, n° 3, p. 233–242.
- Pumain D. (2003). Une approche de la complexité en géographie. *Geocarrefour*, vol. 78, n° 1, p. 25–31.
- R Core Team. (2015). R: A language and environment for statistical computing Manuel de logiciel. Vienna, Austria. Consulté sur <http://www.R-project.org/>
- Raimbault J., Banos A., Doursat R. (2014). A hybrid network/grid model of urban morphogenesis and optimization. In *Proceedings of the 4th international conference on complex systems and applications (iccsa 2014), june 23-26, 2014, uni-*

- versité de normandie, le havre, france; m. a. aziz-alaoui, c. bertelle, x. z. liu, d. olivier, eds.: pp. 51-60.*
- Reuillon R., Leclaire M., Rey-Coyrehourcq S. (2013). Openmole, a workflow engine specifically tailored for the distributed exploration of simulation models. *Future Generation Computer Systems*, vol. 29, n° 8, p. 1981–1990.
- SDRIF. (2013). *Île-de-france 2030. orientations réglementaires et carte de destination générale des différentes parties du territoire.*
- STIF. (2010). *Arcexpress, débat public sur le métro de rocade. dossier du maître d'ouvrage.*  
archived at [http://archive.wikiwix.com/cache/?url=http%3A%2F%2Fwww.debatpublic-arcexpress.org%2F\\_script%2Fntsp-document-file\\_download.php%3Fdocument\\_id%3D92%26document\\_file\\_id%3D106](http://archive.wikiwix.com/cache/?url=http%3A%2F%2Fwww.debatpublic-arcexpress.org%2F_script%2Fntsp-document-file_download.php%3Fdocument_id%3D92%26document_file_id%3D106).
- Xie F., Levinson D. (2009). How streetcars shaped suburbanization: a granger causality analysis of land use and transit in the twin cities. *Journal of Economic Geography*, p. lbp031.