

Des systèmes naturels aux systèmes urbains: génération de réseaux de transport optimaux par modèle *slime-mould*

J. Raimbault^{1,2}

¹ UPS CNRS 3611 ISC-PIF et ² UMR CNRS 8504 Géographie-cités



Introduction

- ▶ Méthodes classiques de conception et d'évaluation des infrastructures de transport basées sur scénarios exogènes [Wegener and Fürst, 2004]; de type optimisation et/ou analyse de données [Karlaftis and Vlahogianni, 2011].
- ▶ Ingénierie morphogénétique à la croisée des systèmes auto-organisés et architecturés [Doursat et al., 2012] ; application démontrée à la conception d'infrastructures de transport [Bebber et al., 2007].
- ▶ Application d'un modèle de croissance de *slime-mould* à la conception multi-objectifs d'un réseau de transport.

Modèle

Modèle de croissance d'un *slime-mould* [Tero et al., 2010] : principe d'exploration puis renforcement.

→ *Etude de l'aspect renforcement* : réseau initial homogène de tubes ij , longueur L_{ij} , diamètre variable D_{ij} , traversés par un flux de fluide Q_{ij} . Sommets i à la pression p_i . Un nombre de noeuds N sont à desservir, parmi eux aléatoirement à chaque étape l'un est source $p_{i_+} = l_0$ et l'autre puits $p_{i_-} = -l_0$

→ *Itération du modèle* :

1. Détermination des flux par lois de Kirchoff (analogie électrostatique, résolution d'un système fermé) : loi d'Ohm

$$Q_{ij} = \frac{D_{ij}}{L_{ij}} \cdot (p_i - p_j) \quad (1)$$

et conservation des flux

$$\sum_{j \rightarrow i} Q_{ij} = 0, \sum_{j \rightarrow i_{\pm}} Q_{i_{\pm}j} = \pm l_0 \quad (2)$$

2. Evolution du diamètres de tubes (γ paramètre de renforcement)

$$\frac{dD_{ij}}{dt} = \frac{|Q_{ij}|^{\gamma}}{1 + |Q_{ij}|^{\gamma}} - D_{ij} \quad (3)$$

→ *Extraction du réseau final* après convergence selon un paramètre de seuil de diamètre ou un nombre maximal d'itérations.

Indicateurs

Comportement du modèle évalué au travers d'indicateurs contradictoires de performance pour le réseau généré (V_f , E_f):

- ▶ Coût de construction $c = \sum_{ij \in E_f} D_{ij}(t_f)$
- ▶ Performance moyenne [Banos and Genre-Grandpierre, 2012]

$$v = \frac{1}{|V_f|^2} \sum_{i,j \in V_f} \frac{d_{i \rightarrow j}}{||\vec{i} - \vec{j}||}$$

- ▶ Robustesse: indice *Network Trip Robustness*, impact de la suppression des liens [Sullivan et al., 2010]

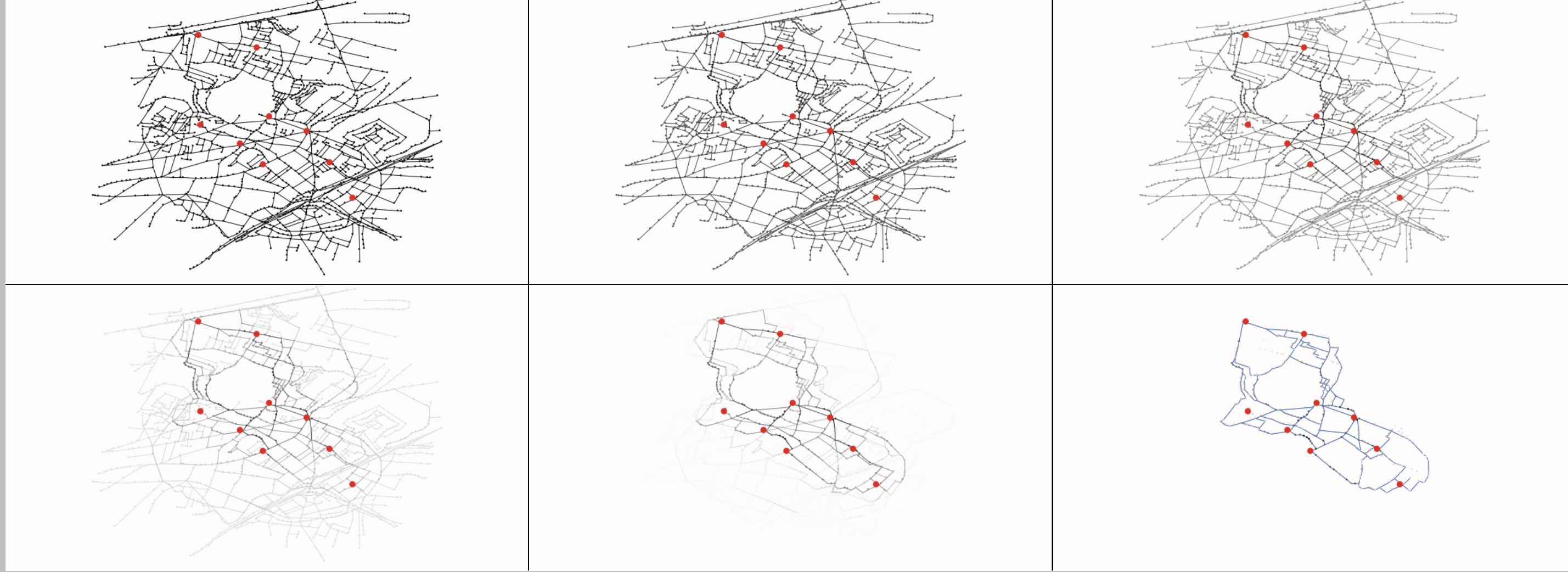
Exploration du modèle

Exploration de l'espace des paramètres du modèle par calcul intensif, rendu transparent par le logiciel libre d'exploration de modèles OpenMOLE [Reuillon et al., 2013]



Application : desserte optimale

Problème type voyageur de commerce multi-objectifs : itinéraire de desserte pour une navette intra-urbaine avec points de passage imposés, et objectifs de coût et efficacité.



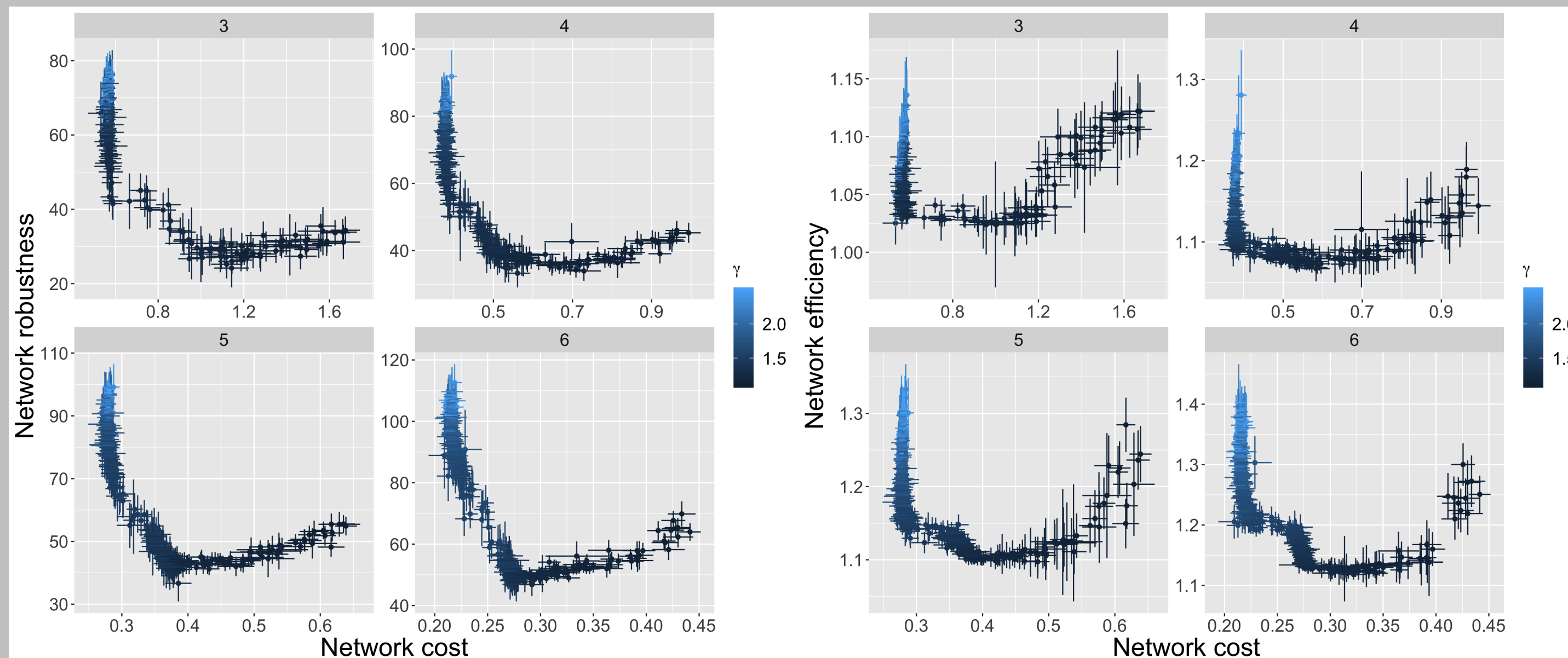
Convergence progressive du réseau vers le réseau optimal desservant les points fixés (en rouge), en partant d'un réseau initial à diamètres égaux (réseau de rues).

Application : réseaux métropolitains

Dans le cadre d'une configuration métropolitaine polycentrique stylisée [Le Néchet and Raimbault, 2015], comment élaborer automatiquement différents scénarios pour un nouveau réseau de transport ?



Réseaux stylisés obtenus pour des valeurs décroissantes de γ , pour une même configuration des centres de population à desservir (densité de population générée par mélange d'exponentielles).



Optimisation de Pareto : fronts bi-objectifs entre les couples d'indicateurs obtenus pour un échantillonnage de 1000 valeurs pour γ , nombre de centres de 3 à 6 (sous-graphes) et 100 répliques (barres d'erreurs : intervalles de confiance à 95%).

References

- Banos, A. and Genre-Grandpierre, C. (2012). Towards new metrics for urban road networks: Some preliminary evidence from agent-based simulations. In *Agent-based models of geographical systems*, pages 627–641. Springer.
- Bebber, D. P., Hynes, J., Darrah, P. R., Boddy, L., and Fricker, M. D. (2007). Biological solutions to transport network design. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 274(1623):2307–2315.
- Doursat, R., Sayama, H., and Michel, O. (2012). *Morphogenetic engineering: toward programmable complex systems*. Springer.
- Karlaftis, M. G. and Vlahogianni, E. I. (2011). Statistical methods versus neural networks in transportation research: Differences, similarities and some insights. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 19(3):387–399.
- 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*.
- 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.
- Sullivan, J., Novak, D., Aultman-Hall, L., and Scott, D. M. (2010). Identifying critical road segments and measuring system-wide robustness in transportation networks with isolating links: A link-based capacity-reduction approach. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 44(5):323–336.
- Tero, A., Takagi, S., Saigusa, T., Ito, K., Bebbber, 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.
- Wegener, M. and Fürst, F. (2004). Land-use transport interaction: state of the art. Available at SSRN 1434678.