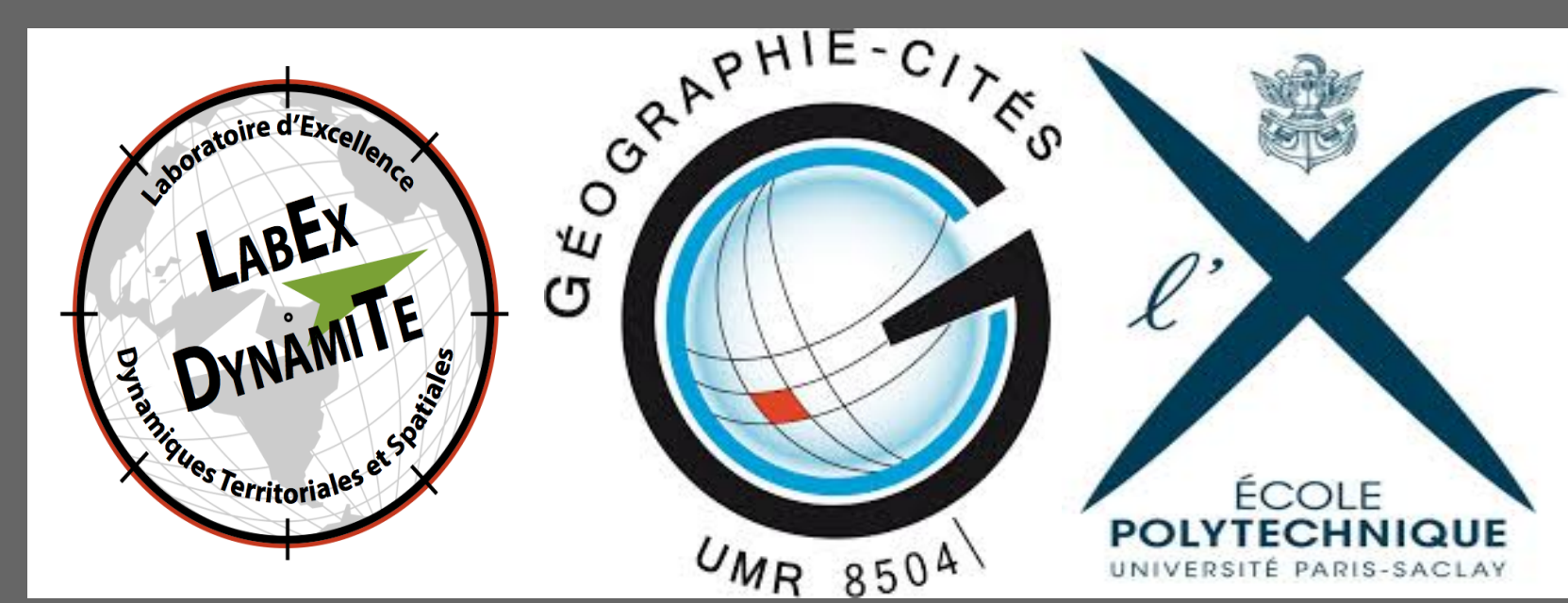


# Application de la Morphogénèse de Réseaux Biologiques à la Conception Optimale d'Infrastructures de Transport

J. Raimbault<sup>1,2</sup> et J. Gonzalez<sup>2</sup>

<sup>1</sup> UMR CNRS 8504 - Géographie-Cités, <sup>2</sup> Ecole Polytechnique



## Introduction

- Conception des infrastructures de transport généralement *top-down* (approche type modèles d'interaction transport-usage du sol [Wegener and Fürst, 2004]).
- Récente introduction des méthodes de *bio-mimétisme* pour le design et le management des systèmes technico-sociaux complexes [Doursat et al., 2012].
- Application efficace aux infrastructures de transports par optimisation multi-objectif (ex. coût, robustesse) émergente [Bebber et al., 2007].
- Dans notre cas, application d'un modèle de morphogénèse de *slime mould* au design optimal de systèmes de transport.

## Modèle

Modèle proposé dans [Tero et al., 2010] : principe *d'exploration puis renforcement* pour une moisissure à la recherche de ressources.

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 ( $\gamma$  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 (distributions finales généralement bimodales).

*Modèle multi-échelle :* Dynamique des diamètres supposées constantes pendant l'itération pour obtenir les flux.

*Implémentation en NetLogo ouverte [Raimbault and Gonzalez, 2014]*

## Indicateurs

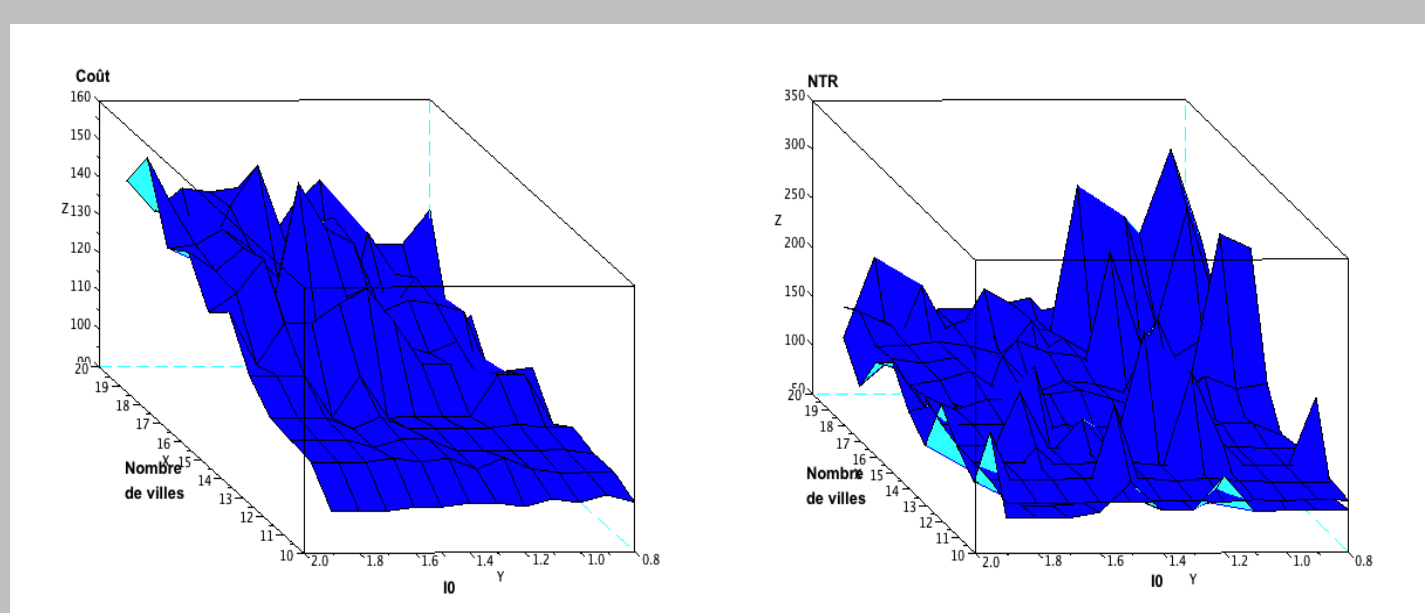
Comportement du modèle évalué au travers d'indicateurs de performance pour le réseau généré  $(V_f, E_f)$ , qui peuvent être vu comme des objectifs contradictoires :

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

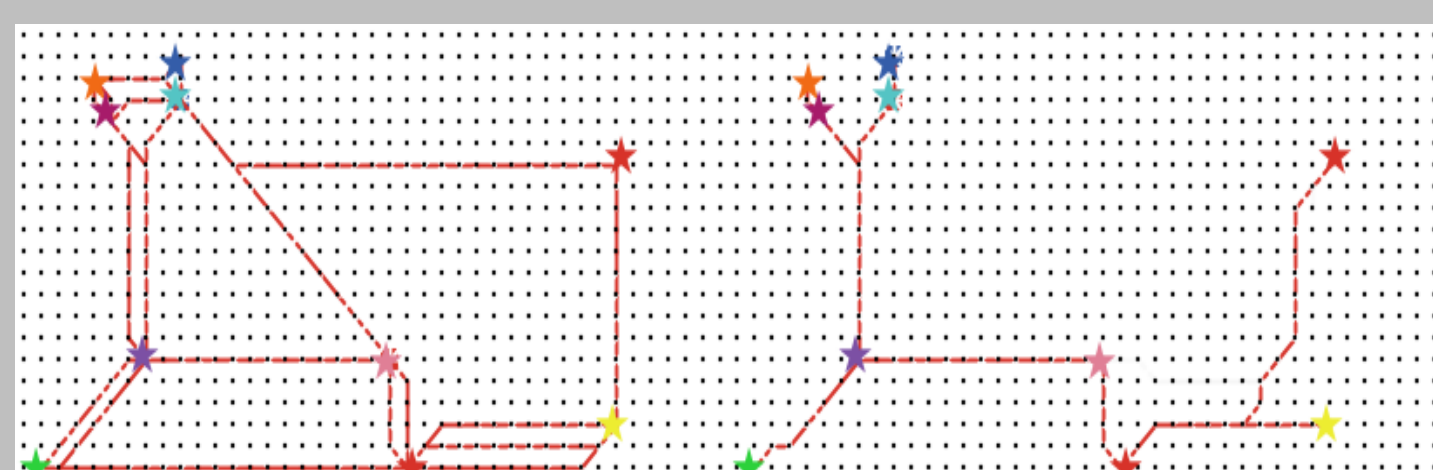
$$v = \frac{1}{|V_f|^2} \sum_{i,j \in V_f} \frac{d_{i \rightarrow j}}{||\vec{i} - \vec{j}||}$$

- Robustesse (indice *Network Trip Robustness* [Sullivan et al., 2010])

## Analyse de Sensibilité



*Sensibilité des indicateurs aux paramètres  $(N, l_0)$ .*

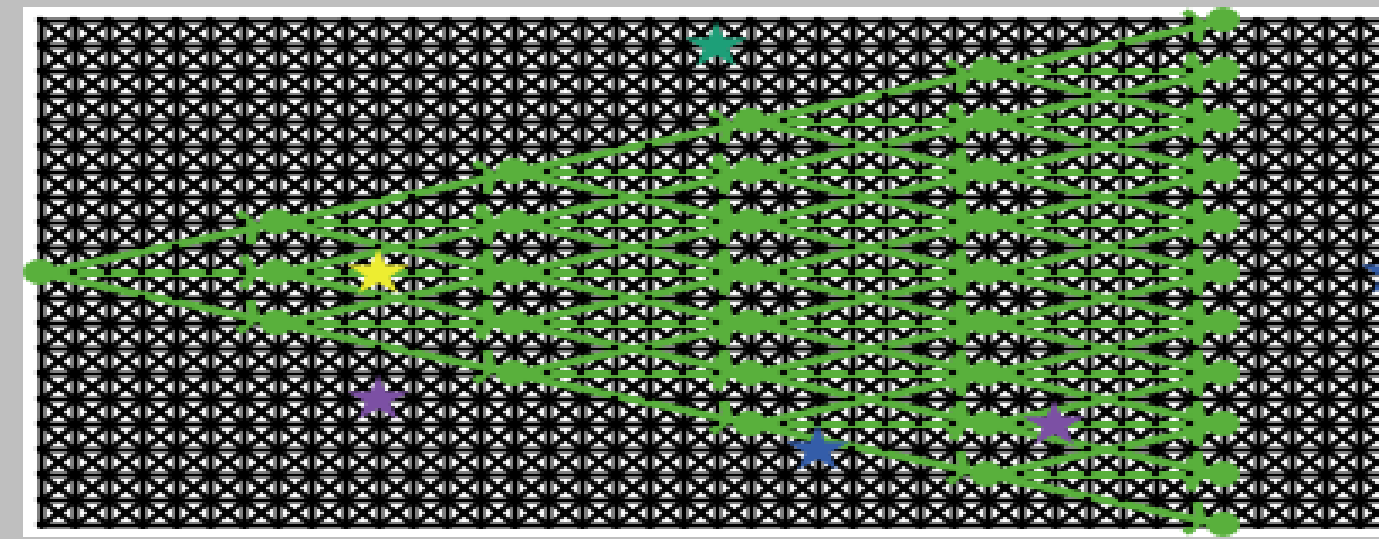


*Sensibilité de la topologie du réseau au coefficient de renforcement  $\gamma$ . Gauche :  $\gamma \sim 1$ , réseau robuste. Droite :  $\gamma \gg 1$ , réseau arborescent.*

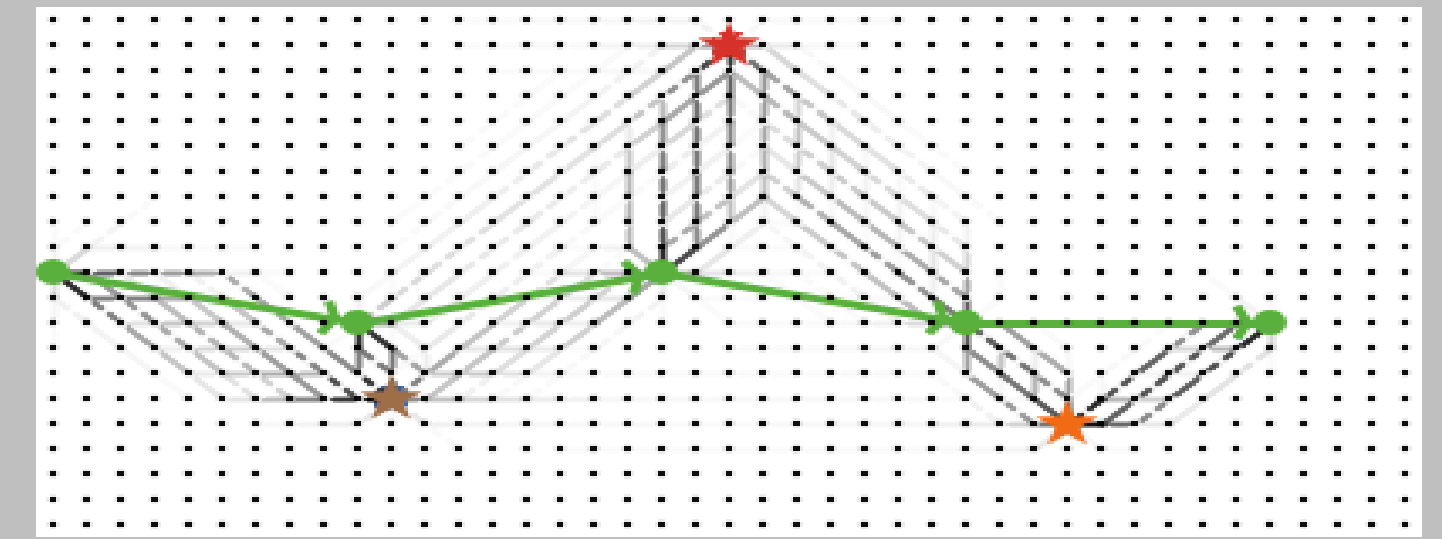
## Application : Corridor Optimal

Application abstraite : *étant donné une distribution de noeuds à desservir (puits), quel est le corridor optimal pour une infrastructure à plus grande échelle (ex. : réseau ferré) pour laquelle les stations sont considérées comme des sources, au sens de l'optimalité multi-critères du réseau local auto-généré dans ce contexte ?*

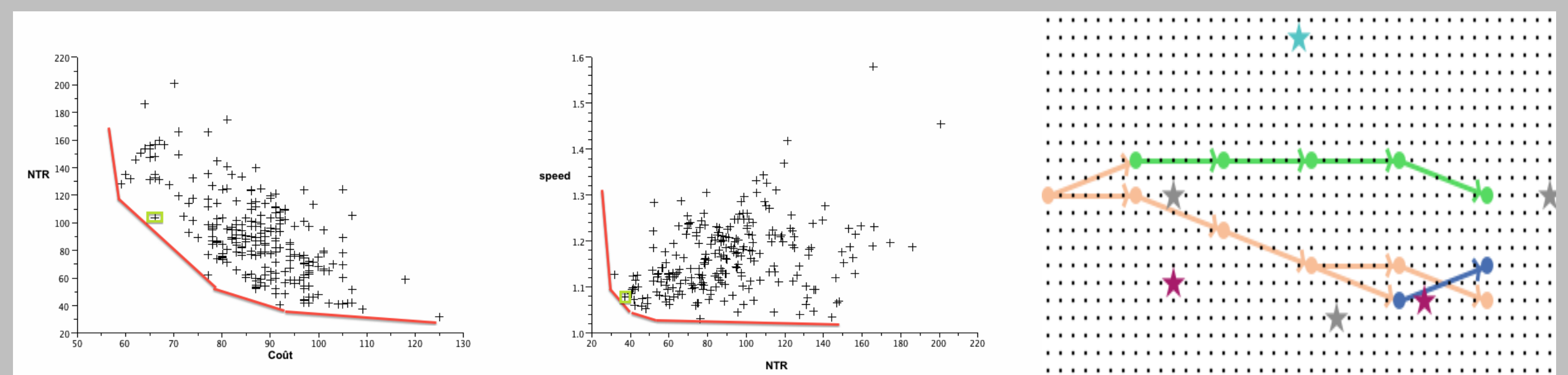
→ Exploration heuristique d'un espace arborescent d'implantations possibles ; obtention des fronts de Pareto pour les différents indicateurs ; choix de solutions optimales au sens de Pareto



*Arbre heuristique d'exploration des implantations.*



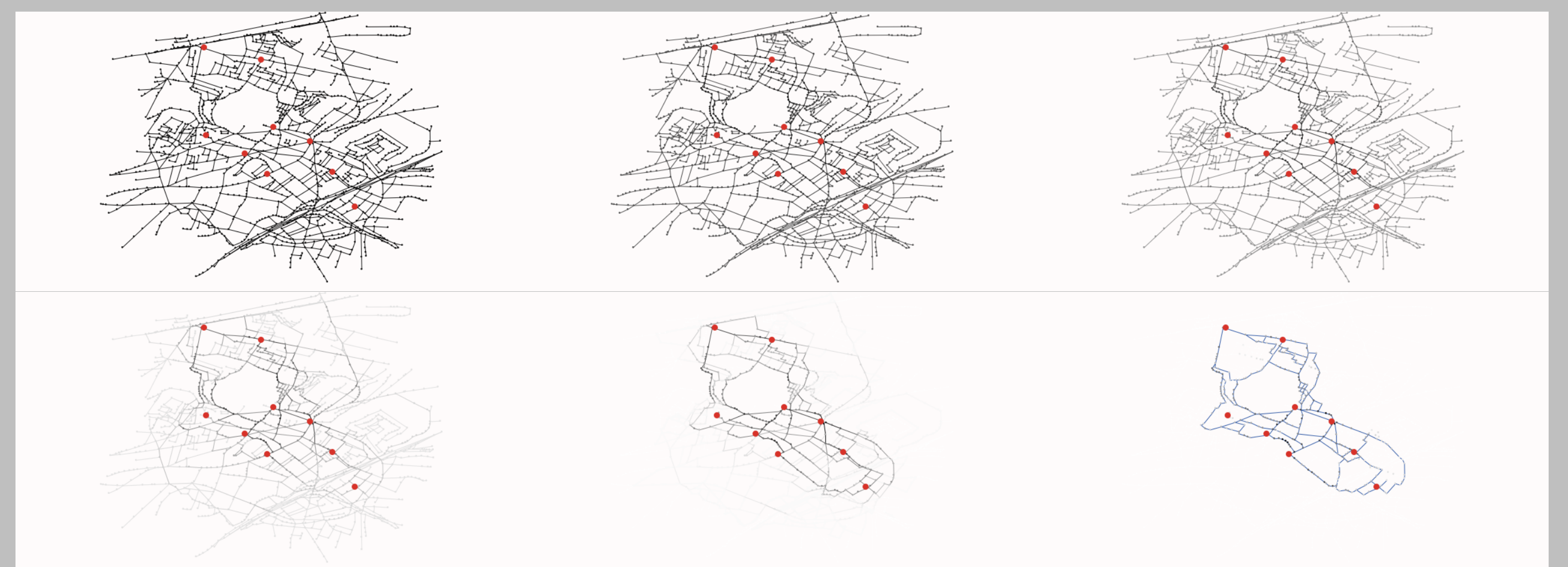
*Exemple de réseau en cours de génération pour une implantation donnée.*



*Optimisation de Pareto : projection des configurations explorées dans l'espace des indicateurs, obtention du front de pareto ; configurations correspondant à trois points optimaux.*

## Application : Desserte Optimale

- Mission de prospective pour la mairie de Romainville : itinéraire d'une navette intra-urbaine avec points de desserte imposés.
- Problème type voyageur de commerce, mais multi-objectif (coût, vitesse, robustesse) : la génération de réseau *bottom-up* par application du modèle sur un réseau initial construit par données géographiques réelles (réseau de rues) donne une solution proche du front de Pareto.



*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).*

## 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.
- Raimbault, J. and Gonzalez, J. (2014). Network generation implementation at <https://github.com/justeraimbault/networkgeneration>.
- 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.