

Analyse spatiale

Modèles de transport et modèles urbains

Juste Raimbault^{1,2,3,4,*}

* juste.raimbault@ign.fr

¹LASTIG, Univ Gustave Eiffel, IGN-ENSG

²CASA, UCL

³UPS CNRS 3611 ISC-PIF

⁴UMR CNRS 8504 Géographie-cités

ING3 - Filière Geo Data Science - UE2 Analyse de données

19/12/2023

Modèles de transport et modèles urbains

1 Introduction

2 Diversité des modèles et applications

3 Modèles de mobilité: prévision de la demande de transport

4 Modèles d'interaction transport-usage du sol

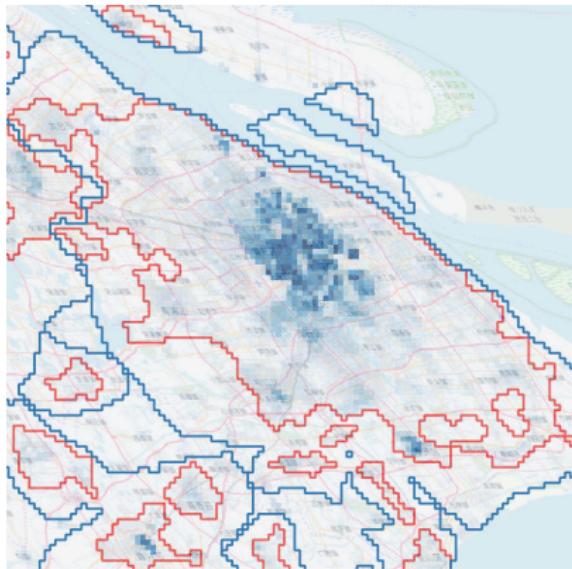
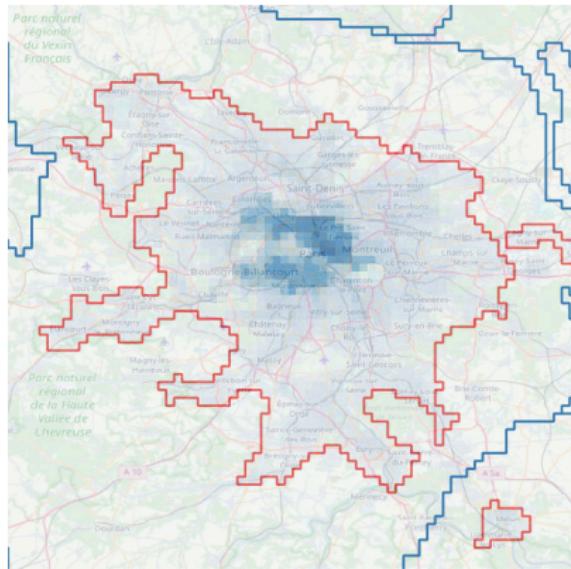
5 Modèles de dynamiques urbaines

6 Modèles de morphogenèse urbaine

- Morphogenèse biologique
- Co-évolution réseaux territoires
- Gouvernance des transports

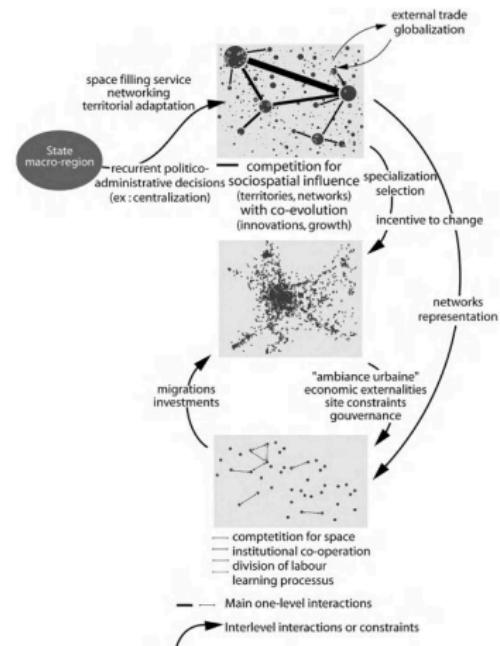
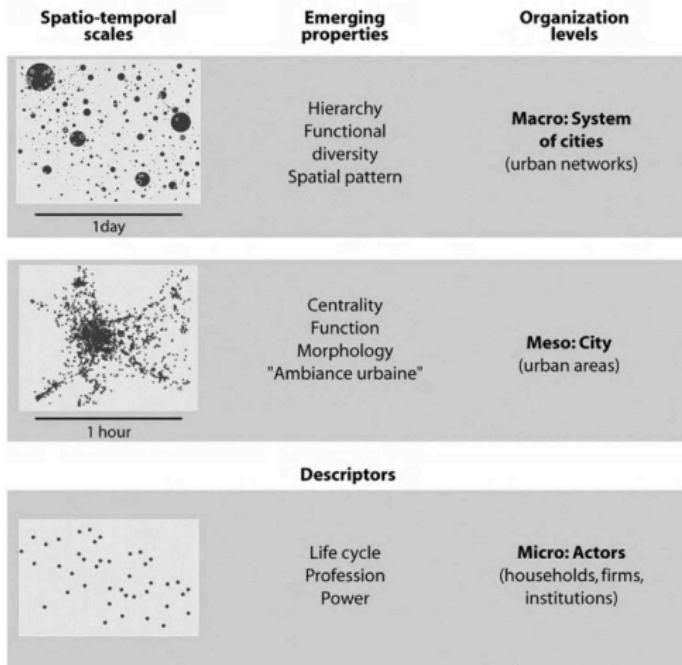
7 Epistémologie des modèles de simulation

Données géographiques et systèmes urbains

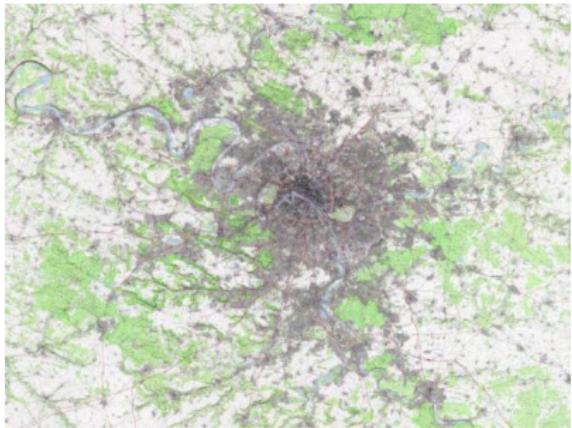
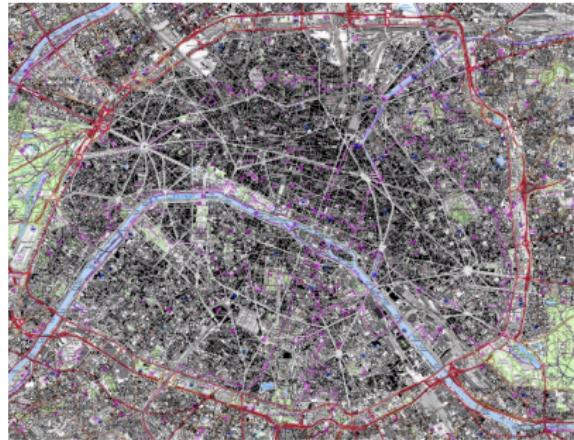


Source : Base de données GHSI [Florczyk et al., 2019]

Théorie évolutive des villes [Pumain, 2008]

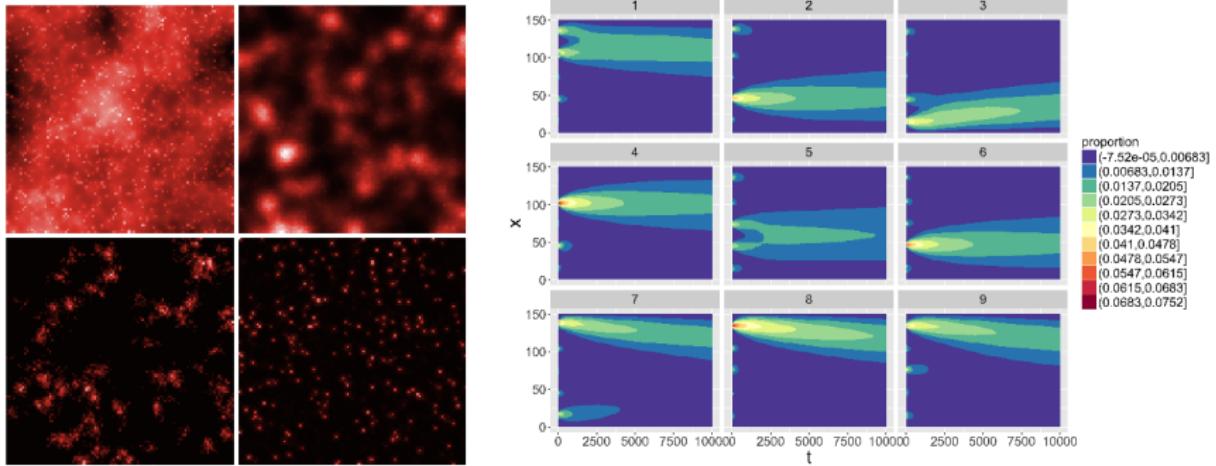


Multi-scalarité des processus géographiques



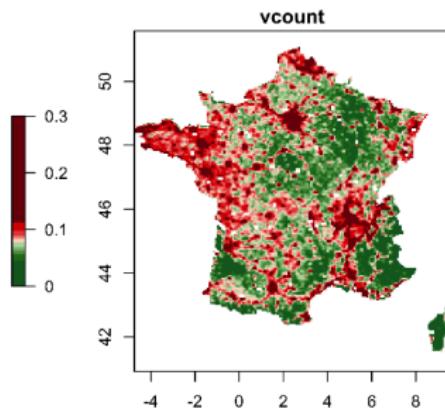
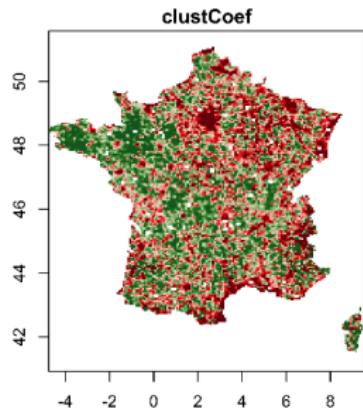
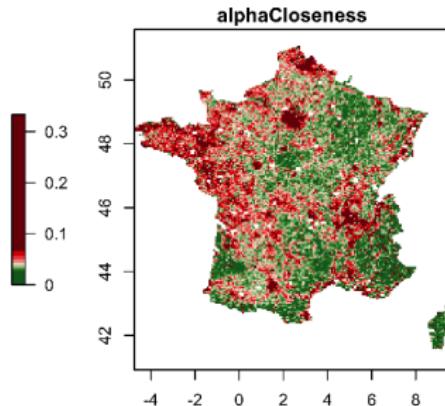
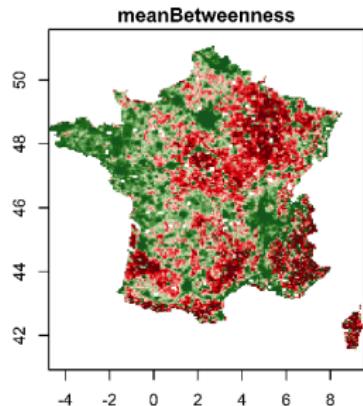
Source: Geoportail

Dépendance au chemin dans les systèmes territoriaux



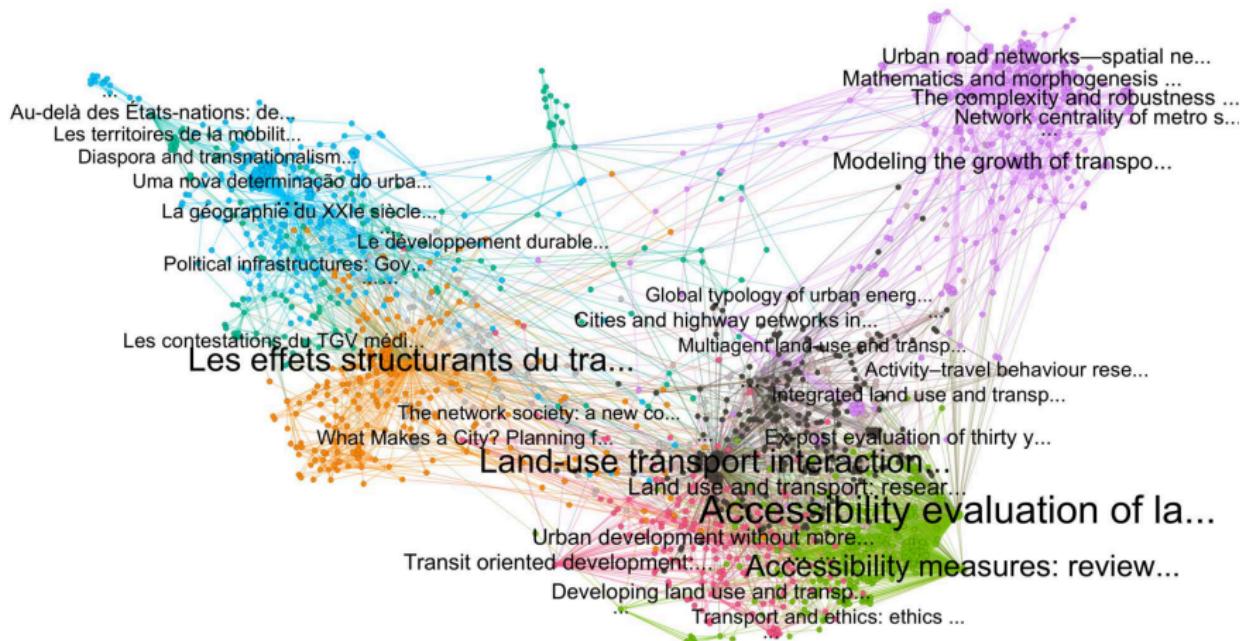
[Raimbault, 2018a]

Non-stationnarité des processus



Interdisciplinarité dans l'étude des systèmes urbains

Modéliser les interactions entre réseaux et territoires [Rimbault, 2018b]

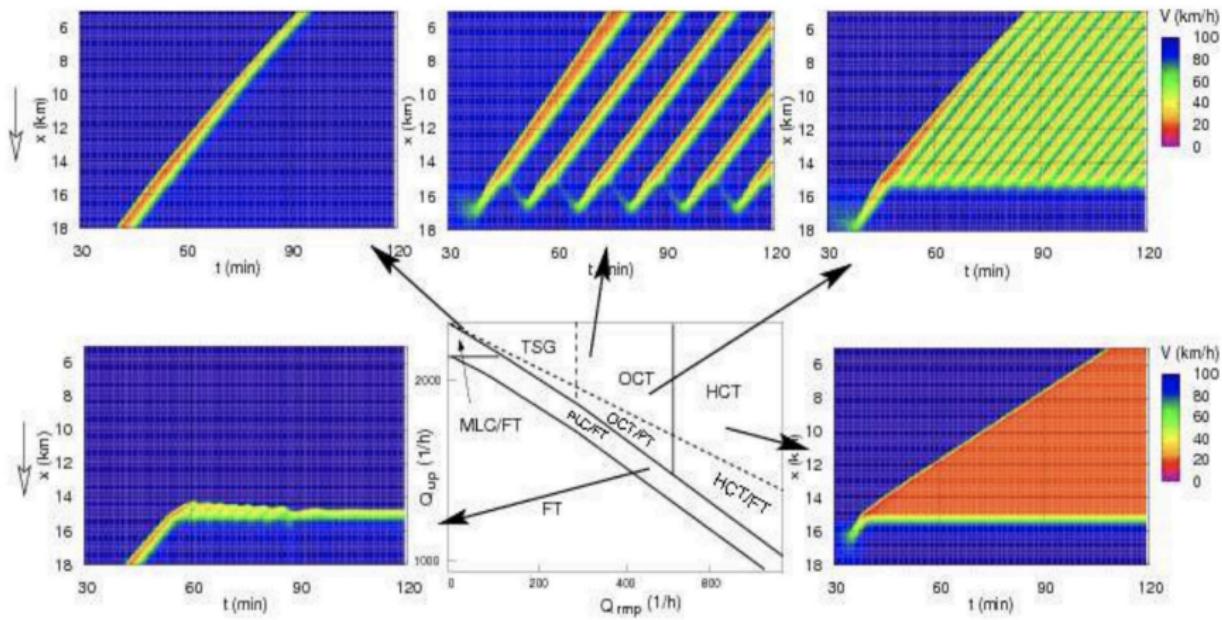


Modèles de transport et modèles urbains

- 1 Introduction
- 2 Diversité des modèles et applications
- 3 Modèles de mobilité: prévision de la demande de transport
- 4 Modèles d'interaction transport-usage du sol
- 5 Modèles de dynamiques urbaines
- 6 Modèles de morphogenèse urbaine
 - Morphogenèse biologique
 - Co-évolution réseaux territoires
 - Gouvernance des transports
- 7 Epistémologie des modèles de simulation

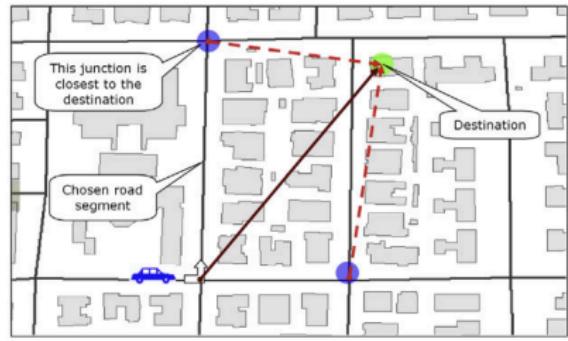
Modélisation du trafic

Diagrammes de phase simulés pour anticiper la congestion
[Treiber et al., 2010]



Modélisation de la congestion des parkings

[Benenson et al., 2008]



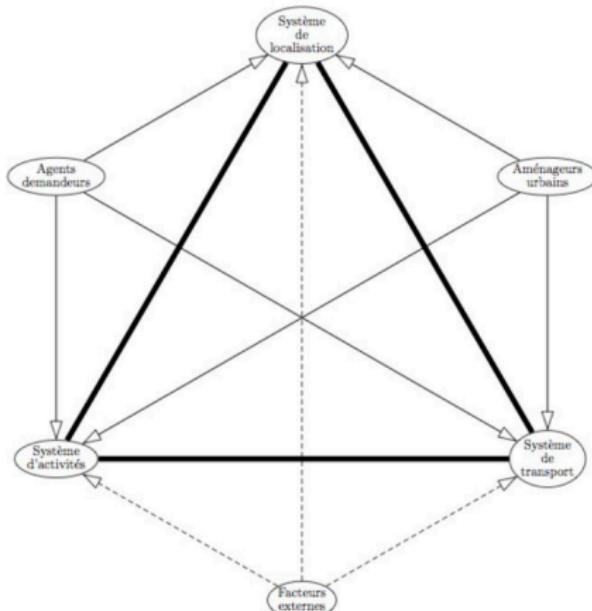
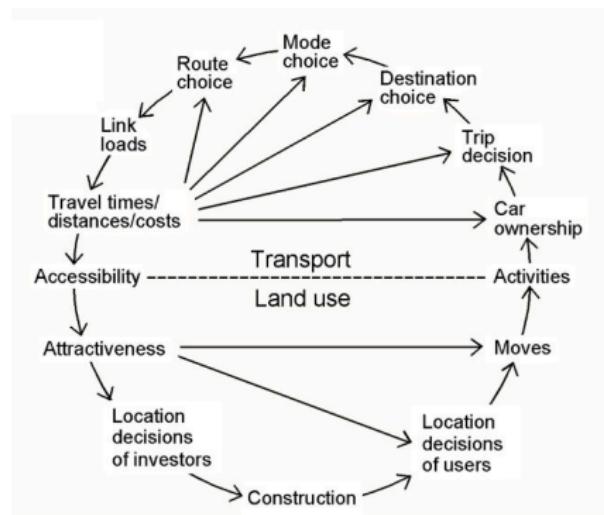
Modélisation piéton

[Banos and Charpentier, 2007]



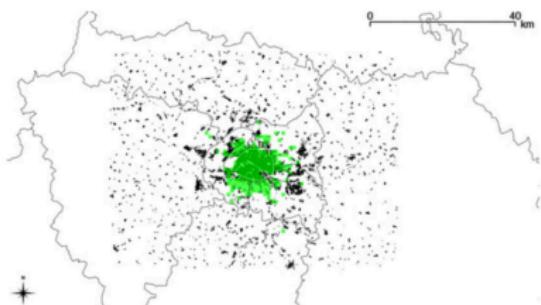
Interactions transport/usage du sol

Cycle de retroactions transport-usage du sol [Wegener, 2004] [Le Néchet, 2010]

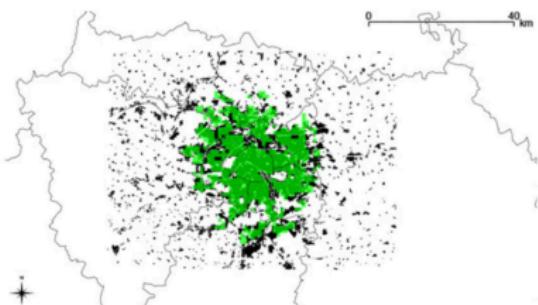


Modélisation du marché immobilier

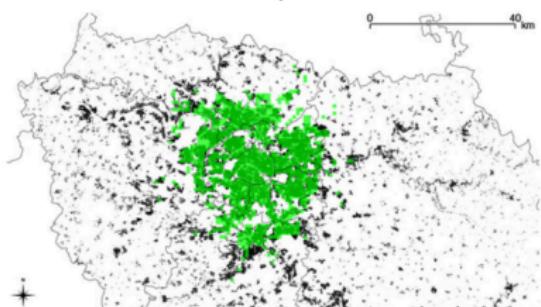
Interaction entre prix immobiliers, coût de transport et densité de population [Viguié et al., 2014]



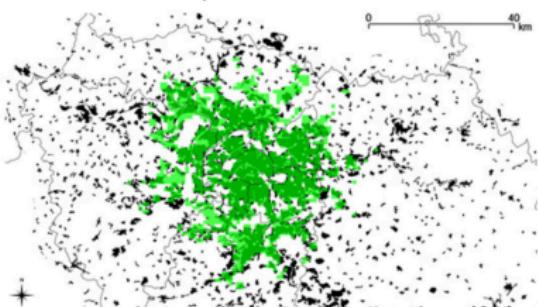
a) 1900



b) 1960

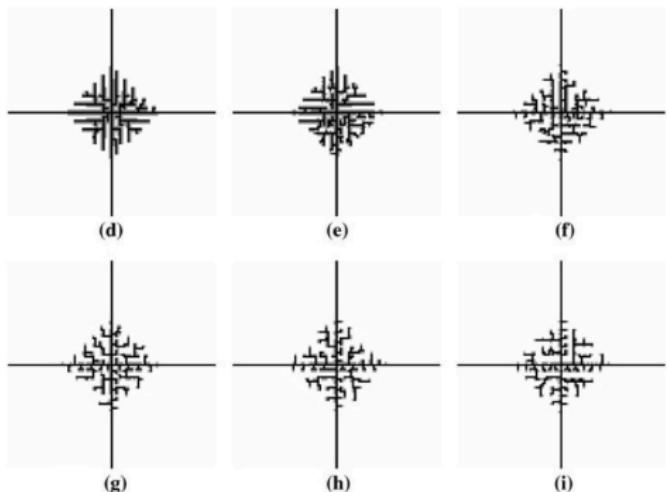


c) 1982

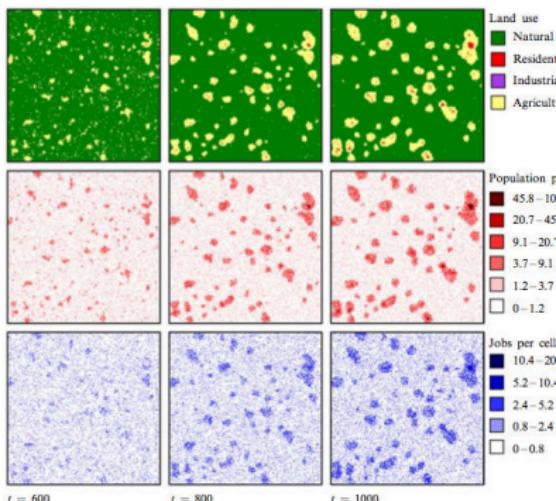


d) 2008

Modélisation de la morphogenèse urbaine



(a) Modèle microéconomique d'étalement,
[Caruso et al., 2011]



(b) Simulations d'usage du sol,
[van Vliet et al., 2012]

Modèles de transport et modèles urbains

- 1 Introduction
- 2 Diversité des modèles et applications
- 3 Modèles de mobilité: prévision de la demande de transport
- 4 Modèles d'interaction transport-usage du sol
- 5 Modèles de dynamiques urbaines
- 6 Modèles de morphogenèse urbaine
 - Morphogenèse biologique
 - Co-évolution réseaux territoires
 - Gouvernance des transports
- 7 Epistémologie des modèles de simulation

Pourquoi modéliser la mobilité ?



103. Rue Montmartre à 9 h 00, *L'illustration* du 16 novembre 1929 (© *L'illustration*/Sygma).

Peut-on "résoudre" le problème de la congestion ?

Modèles de transport/congestion : données

Infrastructures de transport, services

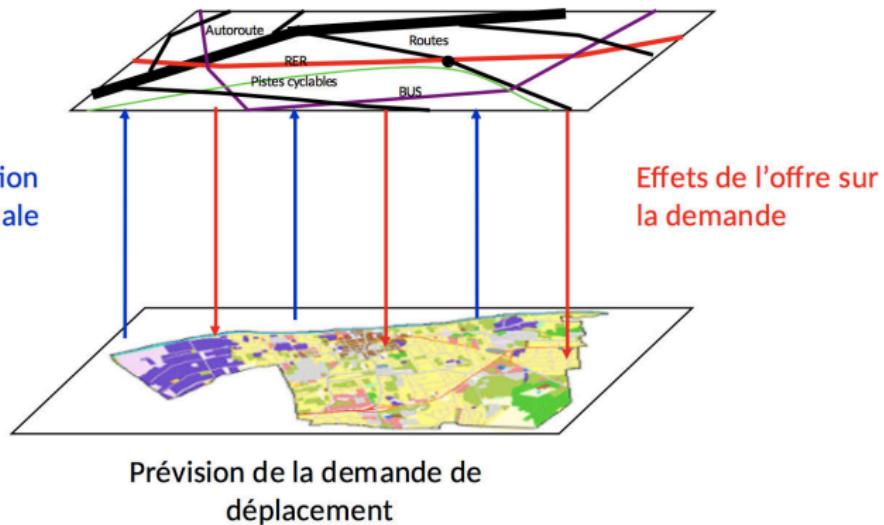
Affectation modale

Données socio-économiques

Occupation des sols

Données sur les déplacements (profils individuels de mobilité, comptages...)

Gestion de la Circulation



Contexte de production des modèles

La matrice technique d'après [Commenges, 2013]

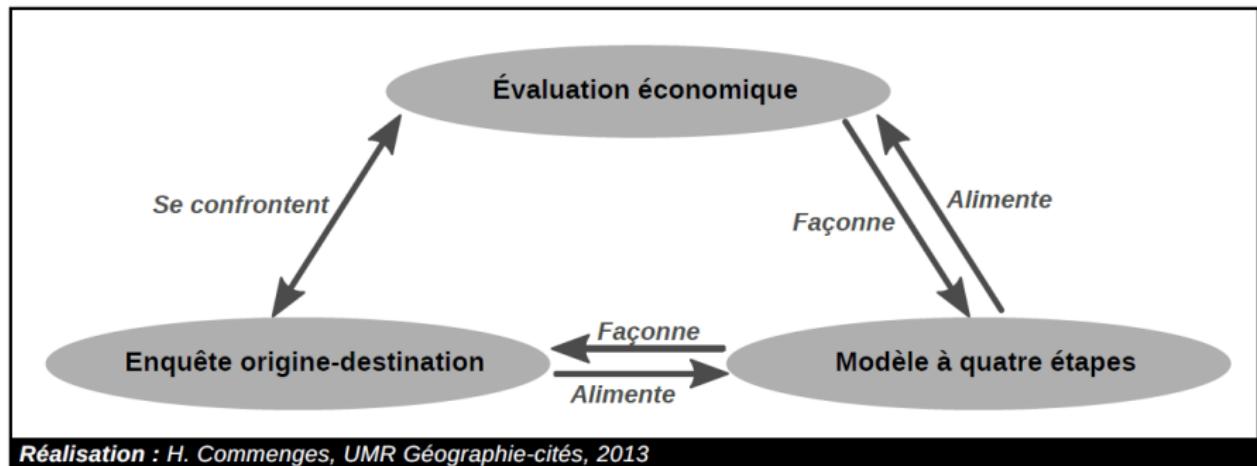
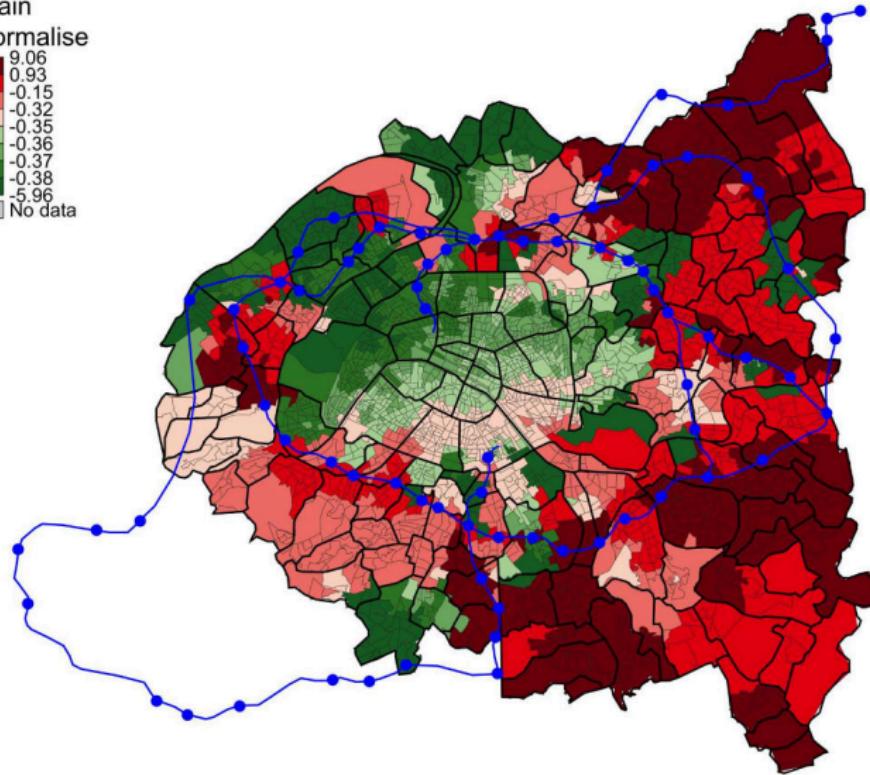


Fig 3.1 – Interrelations des trois dispositifs au sein de la *matrice technique*

Accessibilité et mobilité : gains d'accessibilité

Gains d'accessibilité

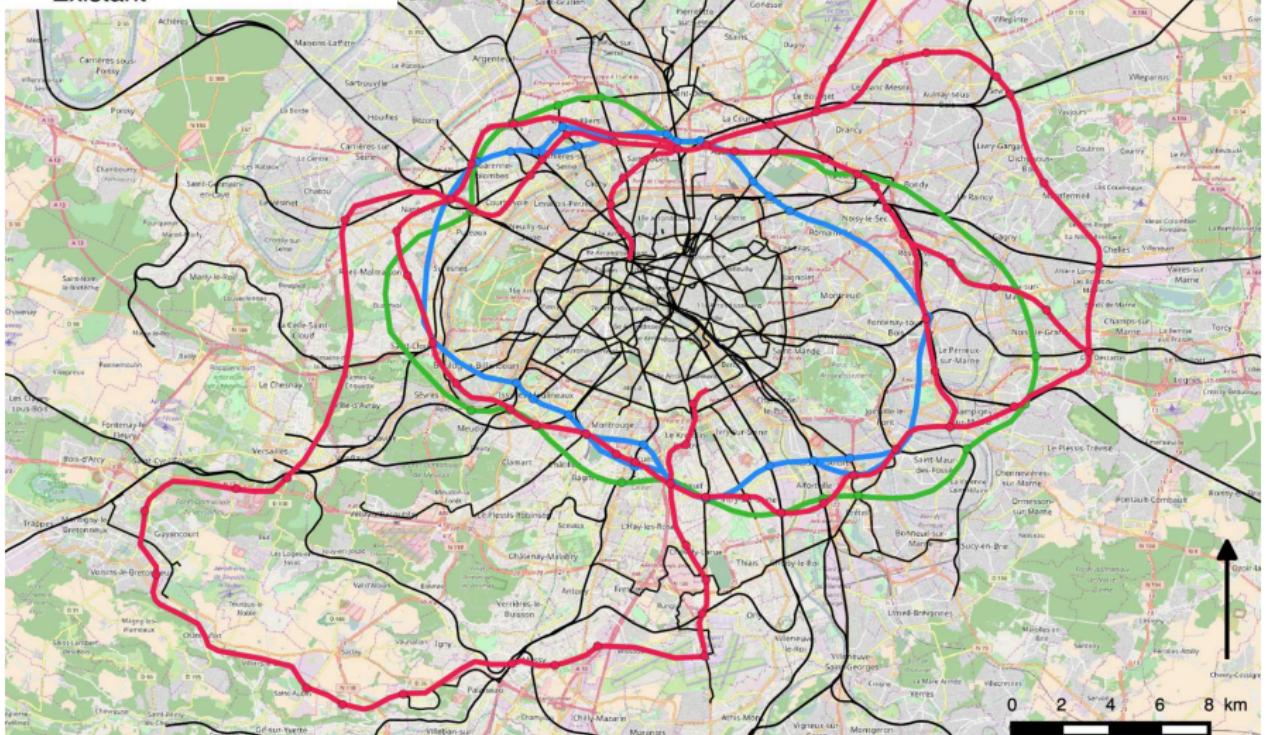
Gain
normalisé



Accessibilité et mobilité : scenarios de transport

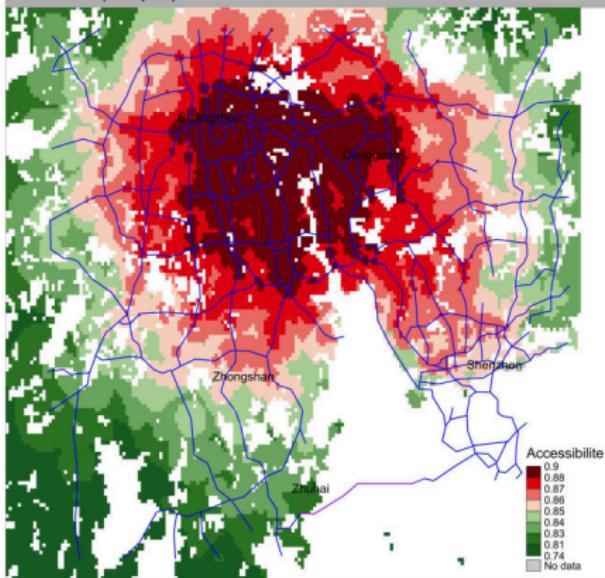
Légende

- Arc Express - proche (2007)
- Arc Express - éloigné (2007)
- Grand Paris Express (2011)
- Existant

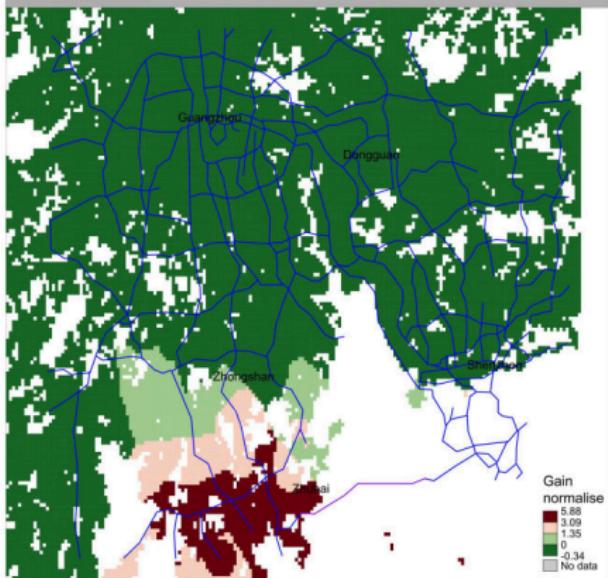


Accessibilité et mobilité : planification

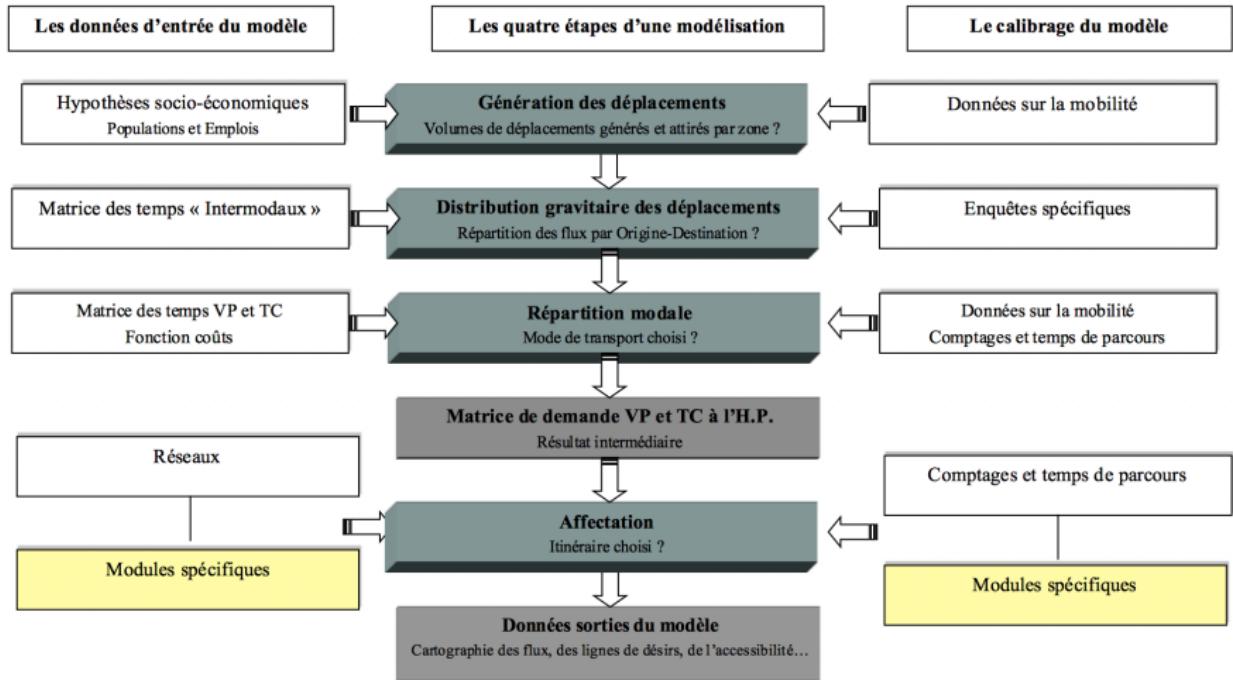
Accessibilité (avec pont)



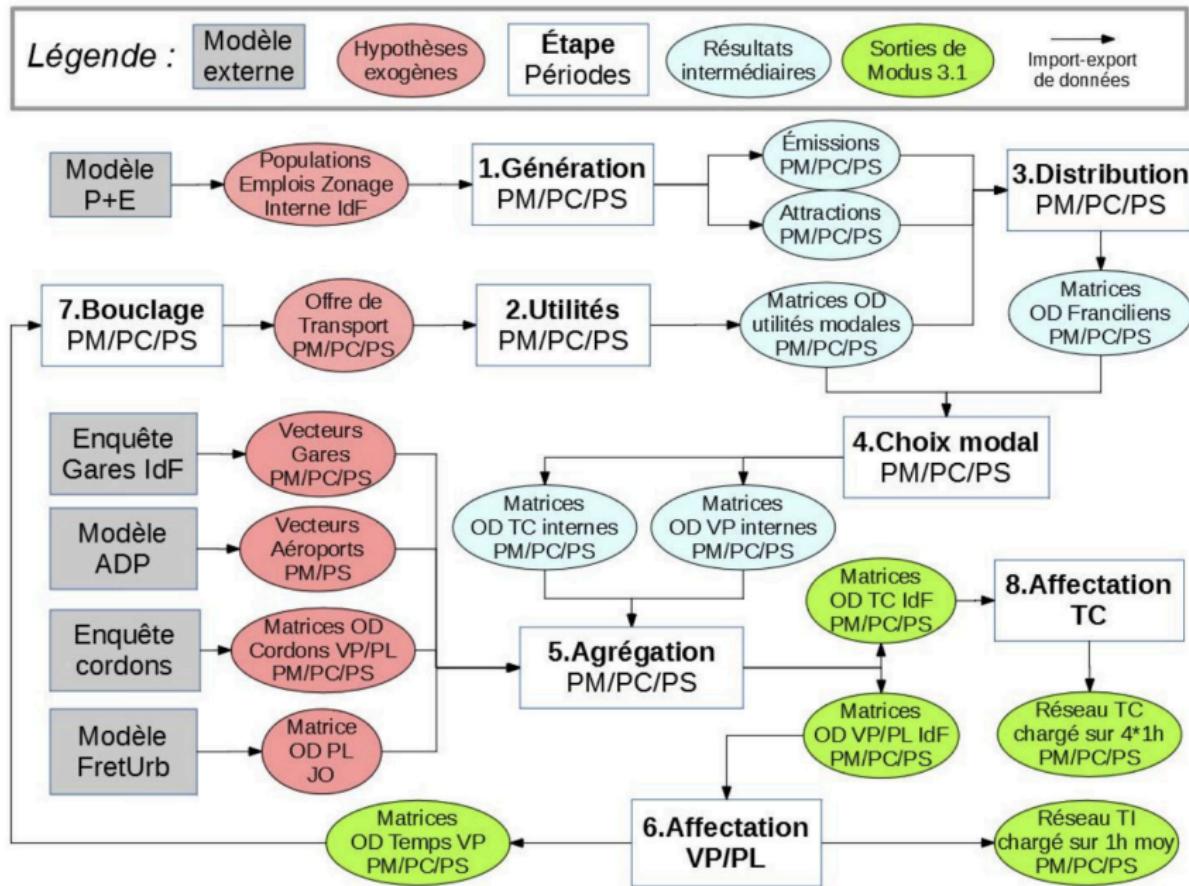
Gains d'accessibilité



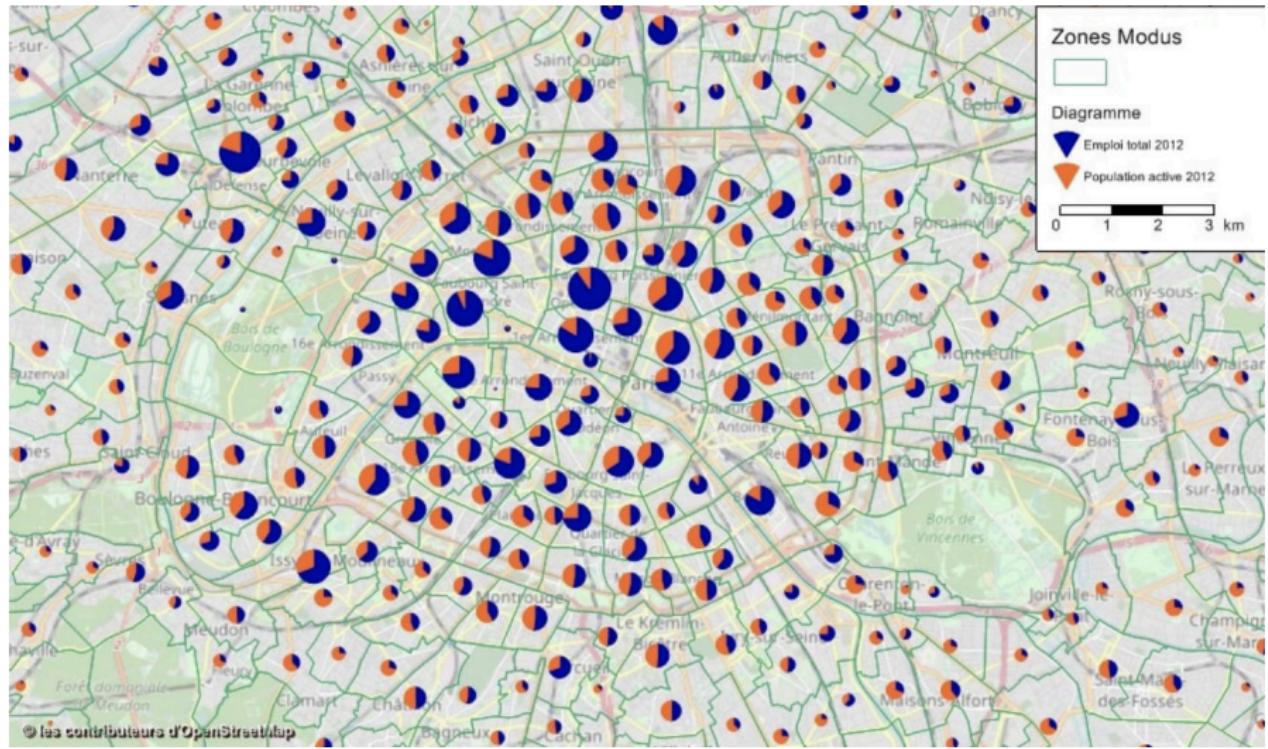
Modèle à quatre étapes : principes généraux



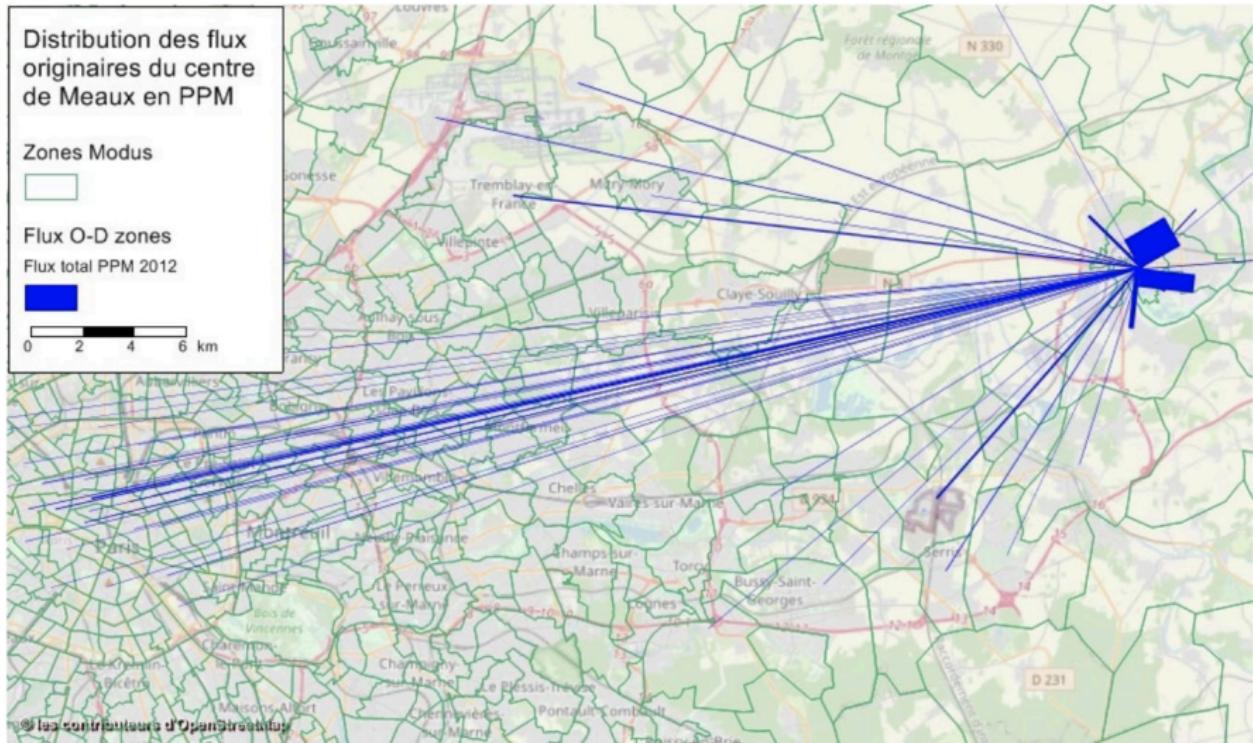
Architecture de Modus 3.1 (DRIEAT)



Modèle à quatre étapes : volumes émis/reçus



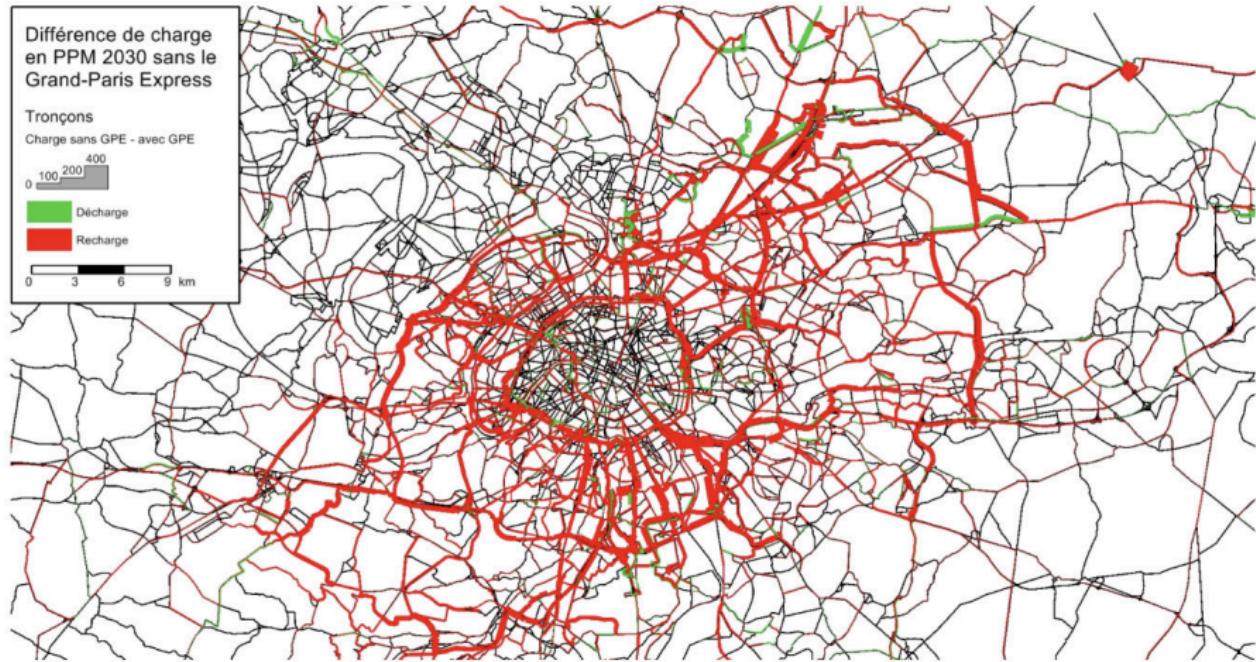
Modèle à quatre étapes : flux O/D



Modèle à quatre étapes : Affectation des itinéraires



Application de Modus : chargement du réseau routier sans GPE

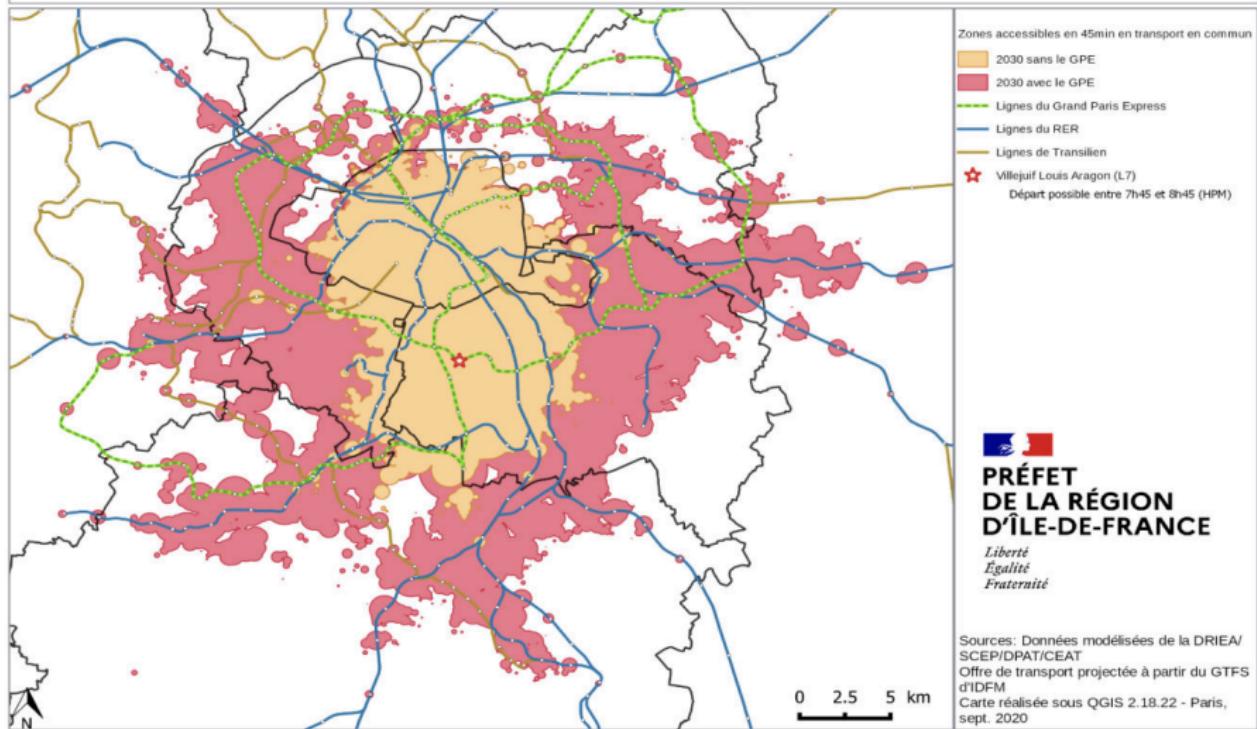


Application de Modus : part modale avec GPE

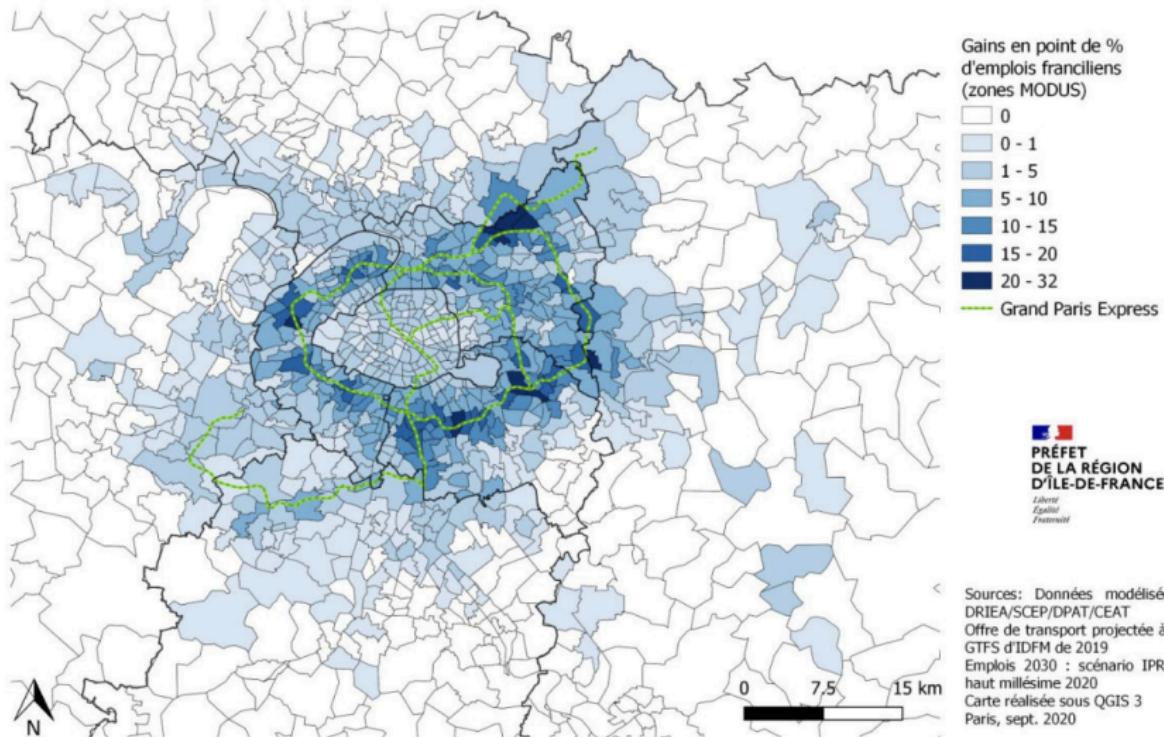


Application de Modus : accessibilité temporelle

Zones accessibles à l'HPM en transports en commun depuis Villejuif Louis Aragon (Villejuif)



Application de Modus : accessibilité aux emplois



Limites du modèle à quatre étapes

Hypothèses théoriques :

- Modèle gravitaire pour génération des flux
- Théorie des choix discrets pour les décisions des utilisateurs
- Algorithmes d'affectation du traffic (équilibre utilisateur)
- Pas de contraintes d'organisation individuelles ni de chaînes de déplacement

Domaines d'application :

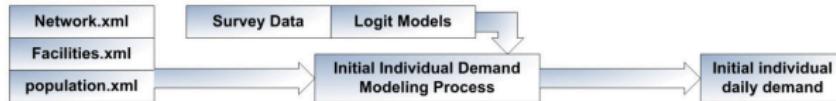
- Horizon temporel (heures creuses, planification à 20 ans)
- Type de politiques publiques pouvant être étudiées (principalement : dimensionnement infrastructure et impact des prix du billet sur le choix modal)

MATSim : microsimulation des transports

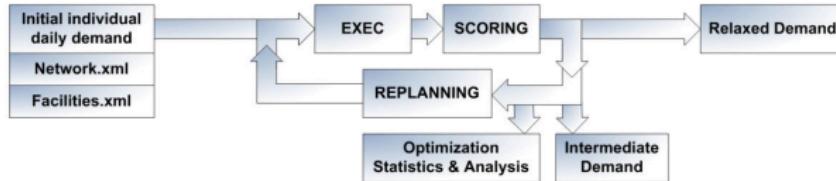
Données hétérogènes et intégration de sous-modèles; simulation basée sur les activités des agents



(a) scenario creation: transport network / locations, capacities and opentimes for activities / synthetic population



(b) initial individual demand modeling: complete daily demand for each individual of the scenario



(c) demand optimization: systematic relaxation process to optimize user specified parts of the daily demand, i.e. route, departure time and activity duration choice



(d) statistical analysis: dynamic traffic volumes / work place occupation density / spider analysis / winner-looser statistics / dynamic traffic visualization / counts comparison / etc.

Modèle modulaire de transport multimodal à quatre étapes, utilisant des projets et données ouvertes [Rimbault and Batty, 2021]

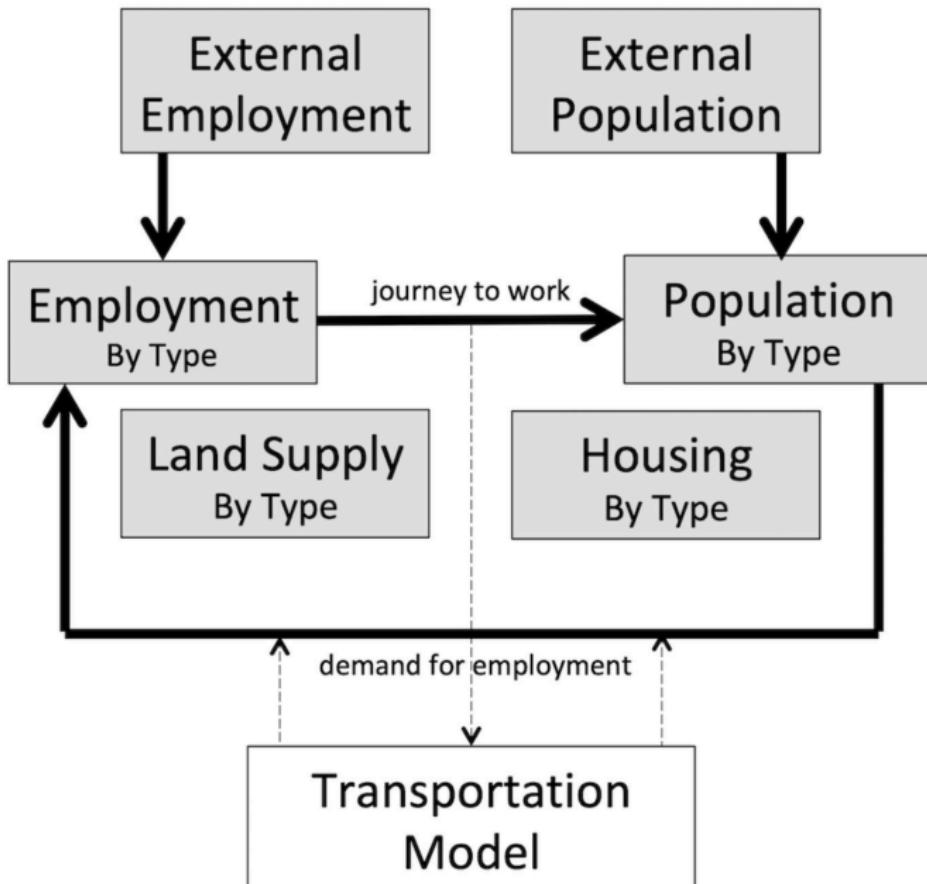
Sous-modèles :

- MATSim (MATSim Community) pour le système de transport
<https://www.matsim.org/> [W Axhausen et al., 2016]
- SPENSER (University of Leeds) pour la population synthétique
<https://github.com/nismod/microsimulation>
[Spooner et al., 2021]
- QUANT (CASA, University College London) pour les interactions spatiales pour générer les plans domicile-travail
<http://quant.casa.ucl.ac.uk/> [Batty and Milton, 2021]
- bibliothèque spatialdata (OpenMOLE community) pour les données
<https://github.com/openmole/spatialdata>
[Rimbault et al., 2020b]

Modèles de transport et modèles urbains

- 1 Introduction
- 2 Diversité des modèles et applications
- 3 Modèles de mobilité: prévision de la demande de transport
- 4 Modèles d'interaction transport-usage du sol
- 5 Modèles de dynamiques urbaines
- 6 Modèles de morphogenèse urbaine
 - Morphogenèse biologique
 - Co-évolution réseaux territoires
 - Gouvernance des transports
- 7 Epistémologie des modèles de simulation

Modèles Land-use Transport Interaction (LUTI)



Modèles LUTI : processus [Wegener, 2004]

Models	Speed of change								
	Very slow		Slow		Fast		Immediate		
	Networks	Land use	Work-places	Housing	Employ-ment	Popula-tion	Goods transport	Travel	
BOYCE	+				+	+			+
CUFM	(+)	+	+	+	+	+			(+)
DELTA	(+)	+	+	+	+	+			(+)
ILUTE	+	+	+	+	+	+	+		+
IMREL	+	+	+	+	+	+			+
IRPUD	+	+	+	+	+	+			+
ITLUP	+	+			+	+			+
KIM	+				+	+	+		+
LILT	+	+	+	+	+	+			+
MEPLAN	+	+	+	+	+	+	+		+
METROSIM	+	+	+	+	+	+			+
MUSSA	(+)			+	+	+			(+)
PECAS	+	+	+	+	+	+	+		+
POLIS	(+)	+			+	+			(+)
RURBAN	(+)	+			+	+			(+)
STASA	+	+	+	+	+	+	+		+
TLUMIP	+	+	+	+	+	+	+		+
TRANUS	+	+	+	+	+	+	+		+
TRESIS	+	+	+	+	+	+			+
URBANSIM	(+)	+	+	+	+	+			(+)

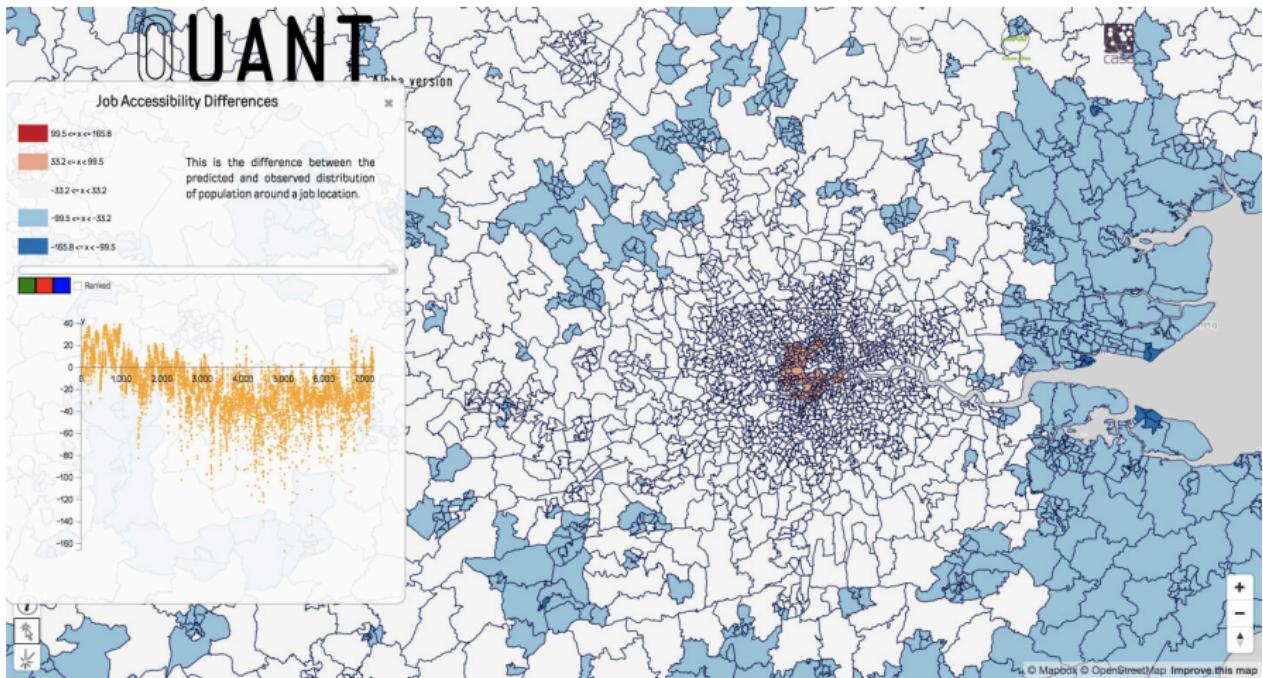
(+) provided by linked transport model

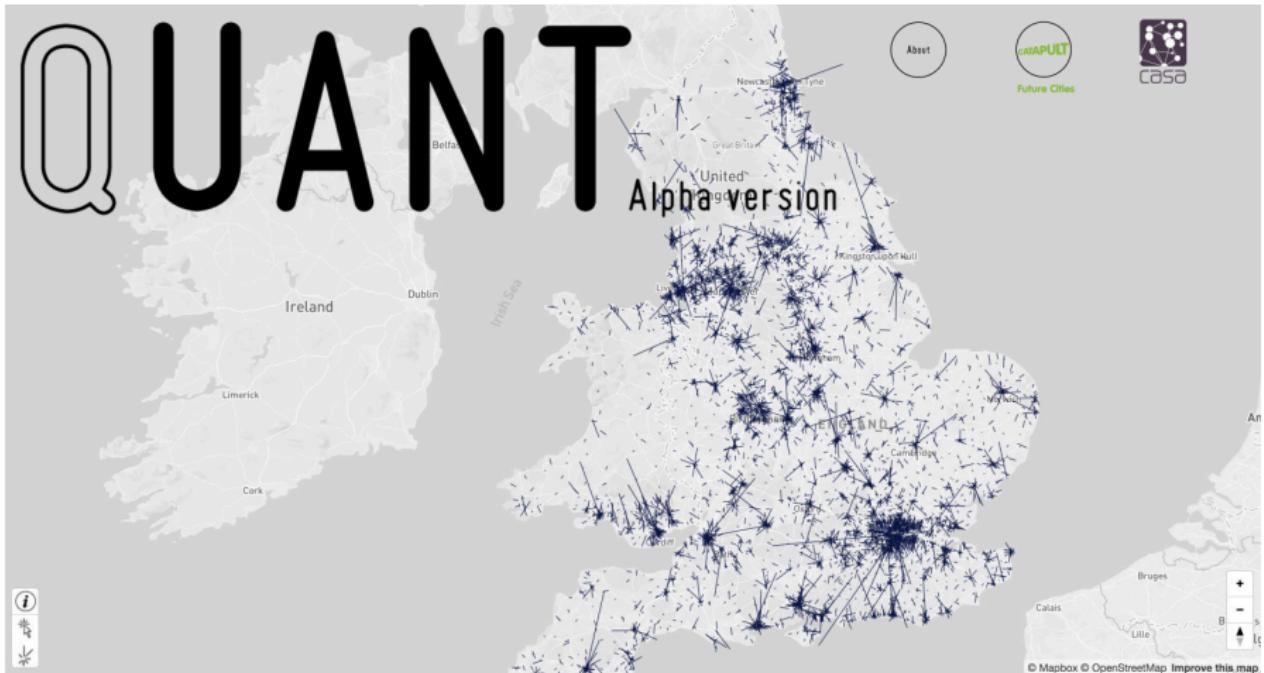
Modèles LUTI : niveau de détail [Wegener, 2004]

Transport model		T1	T2	T3	T4
		No public transport, no modal split	Public transport, no logit, 24 h	Public transport, logit, peak hour	Multimodal, activity-based
Land-use model	L1 None				
	L2 Activity and judgement				
	L3 No market-based land allocation				
	L4 Logit allocation with price signals				
	L5 Market-based land-use model				
	L6 Activity-based land-use model				

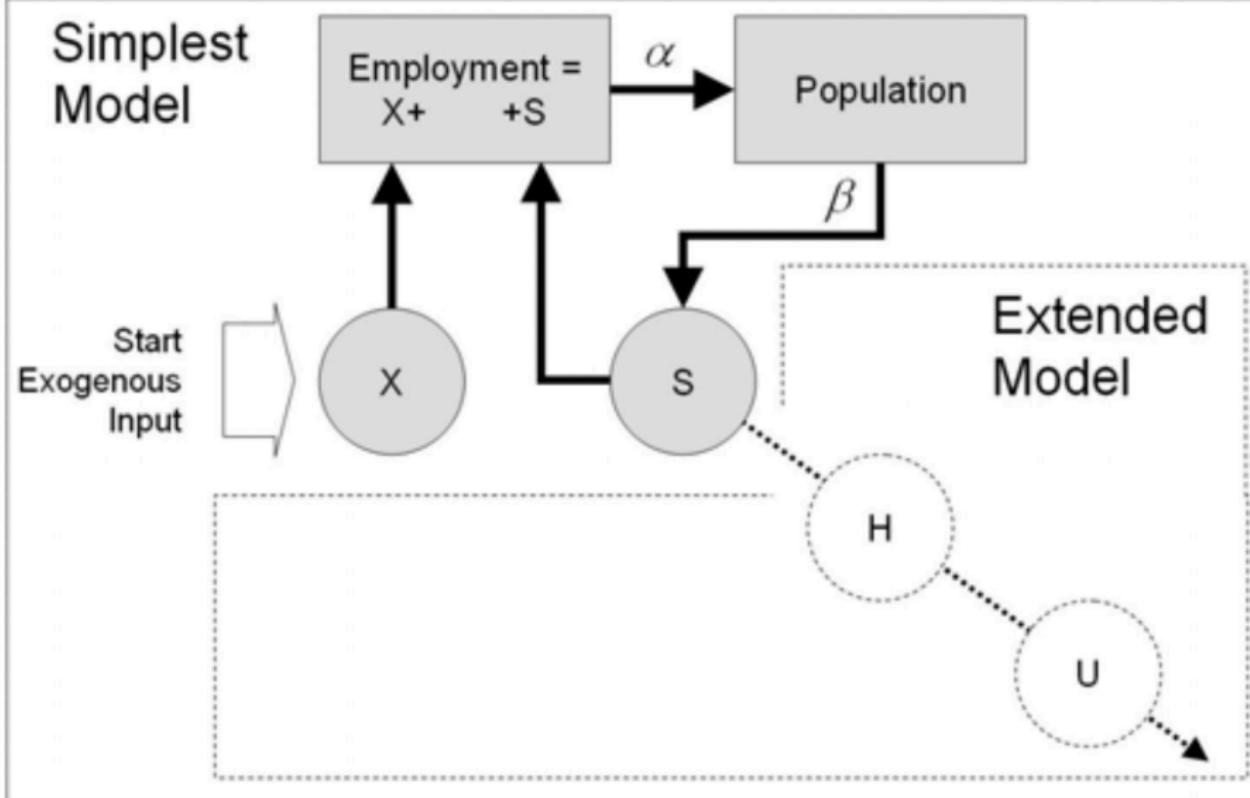
Application: le modèle QUANT

Modèle transport-usage du sol simple mais à l'échelle nationale



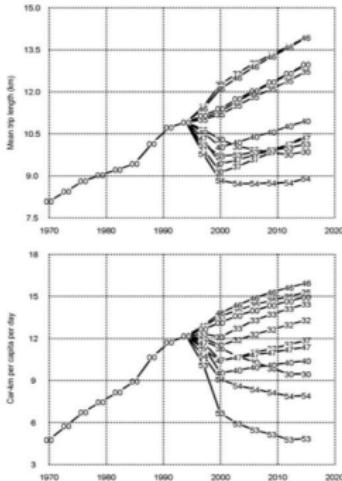
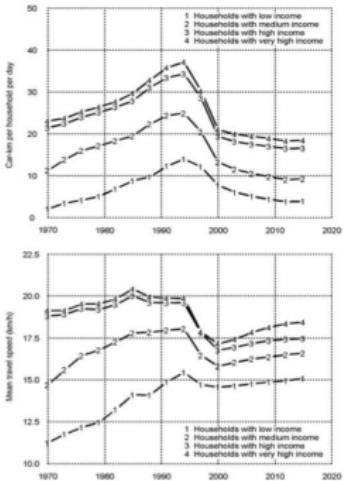
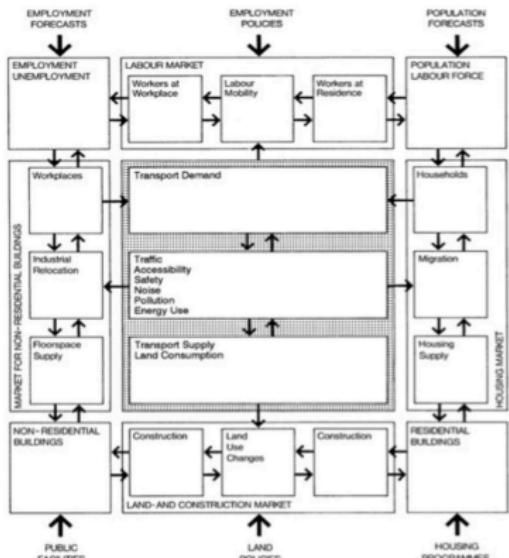


Calcul de l'équilibre population/emploi



Employment: X=Exogenous; S=Service; H=Health; U=Education

Modèle transport-usage du sol plus élaboré: couplage de sous-modules de microsimulation



Modèles de transport et modèles urbains

- 1 Introduction
- 2 Diversité des modèles et applications
- 3 Modèles de mobilité: prévision de la demande de transport
- 4 Modèles d'interaction transport-usage du sol
- 5 Modèles de dynamiques urbaines**
 - 6 Modèles de morphogenèse urbaine
 - Morphogenèse biologique
 - Co-évolution réseaux territoires
 - Gouvernance des transports
- 7 Epistémologie des modèles de simulation

Nouvelles pratiques de modélisation urbaine : ERC Geodivercity

Lecture Notes in Morphogenesis
Series Editor: Alessandro Sarti

Denise Pumain
Romain Reuillon

Urban Dynamics and Simulation Models

 Springer

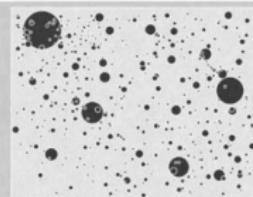
Développement de la théorie évolutive des villes [Pumain, 2018] :

- Faits stylisés récurrents sur les systèmes de villes principaux
- Construction de modèles de simulation au but explicatif
- Outils et méthodes pour explorer les modèles de simulation

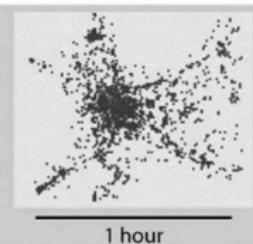


Théorie évolutive des villes

Spatio-temporal scales



1 day



1 hour

Emerging properties

Hierarchy
Functional diversity
Spatial pattern

Organization levels

Macro: System of cities
(urban networks)

Centrality
Function
Morphology
"Ambiance urbaine"

Meso: City
(urban areas)

Descriptors

Life cycle
Profession
Power

Micro: Actors
(households, firms, institutions)

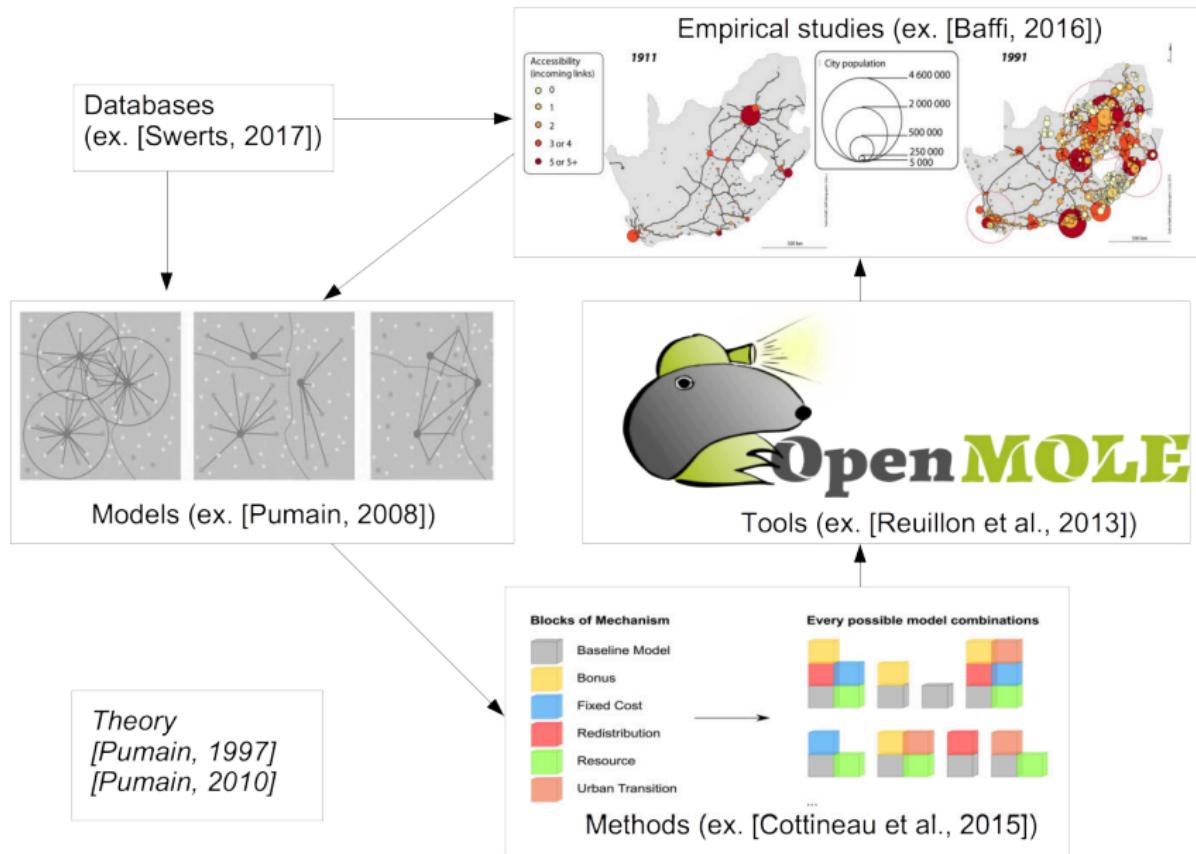
Systèmes de villes comme des systèmes co-évolutifs dans lesquels les interactions sont cruciales

[Pumain, 1997]

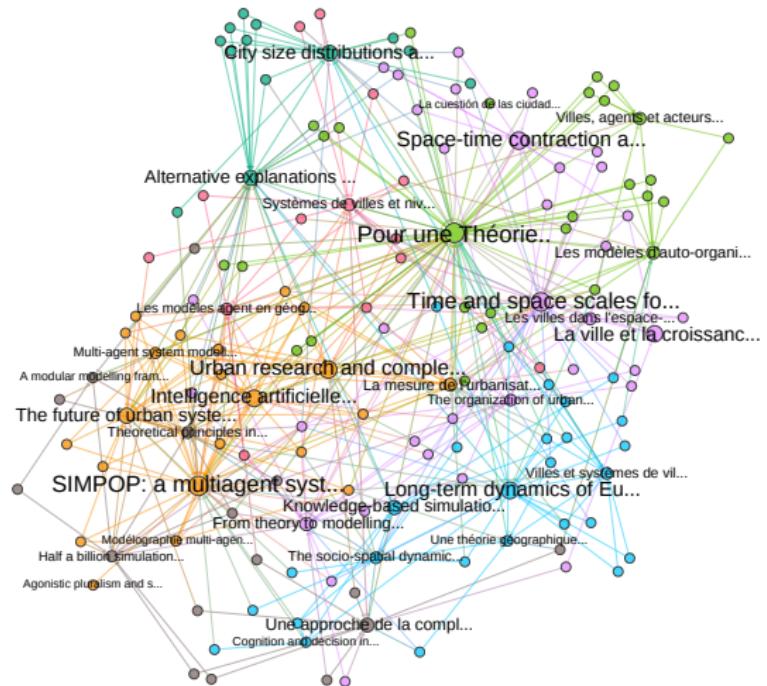
[Pumain, 2008]

[Pumain, 2018]

Construction d'une connaissance dans différents domaines



Théorie évolutive des villes

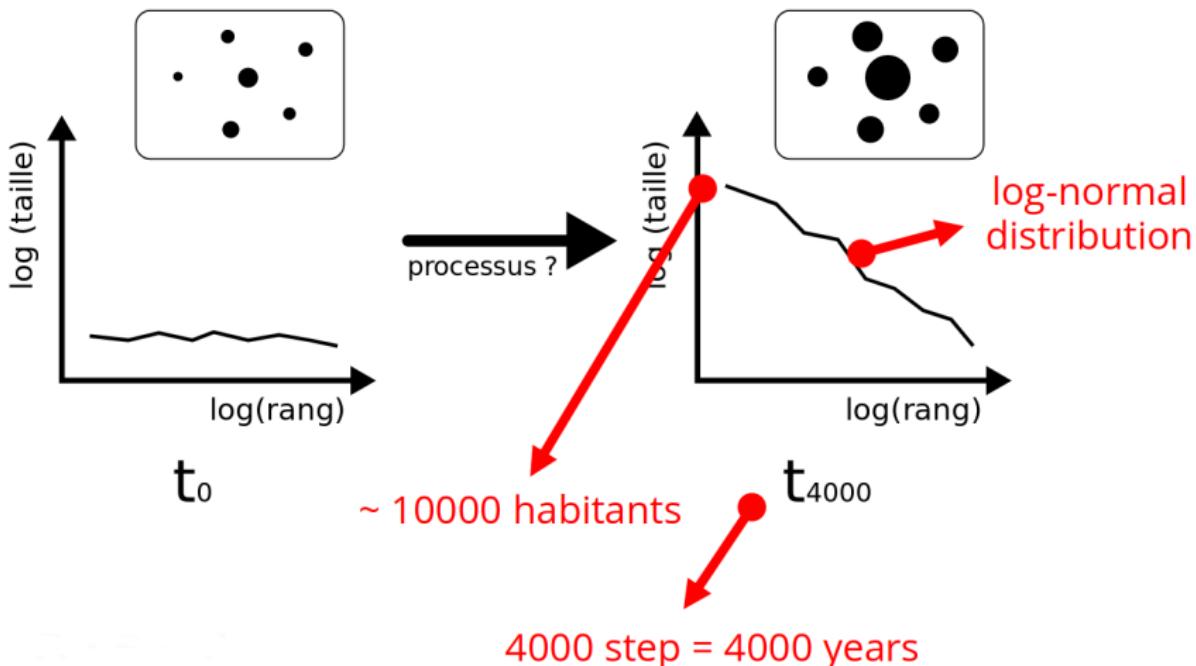


Analyse par réseau de citations des publications principales de la théorie évolutive des villes [Raimbault, 2017]

Calibration du modèle SimpopLocal

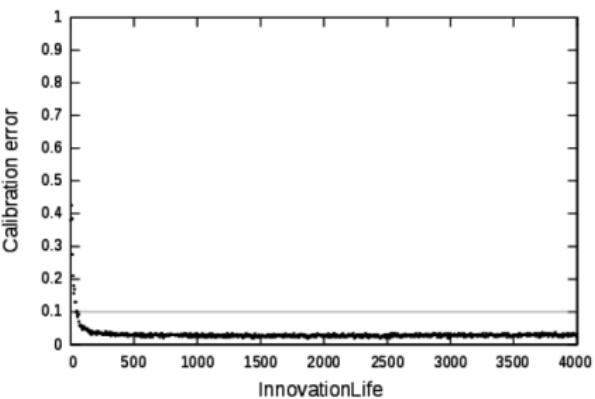
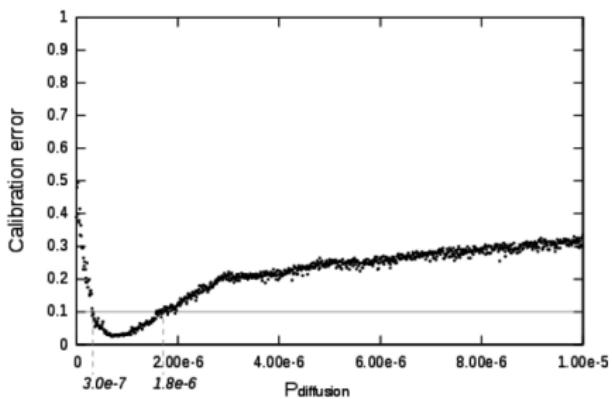
Modèle SimpopLocal calibré par algorithme génétique distribué sur grille de calcul [Schmitt et al., 2015]

Definition des fonctions de fitness :



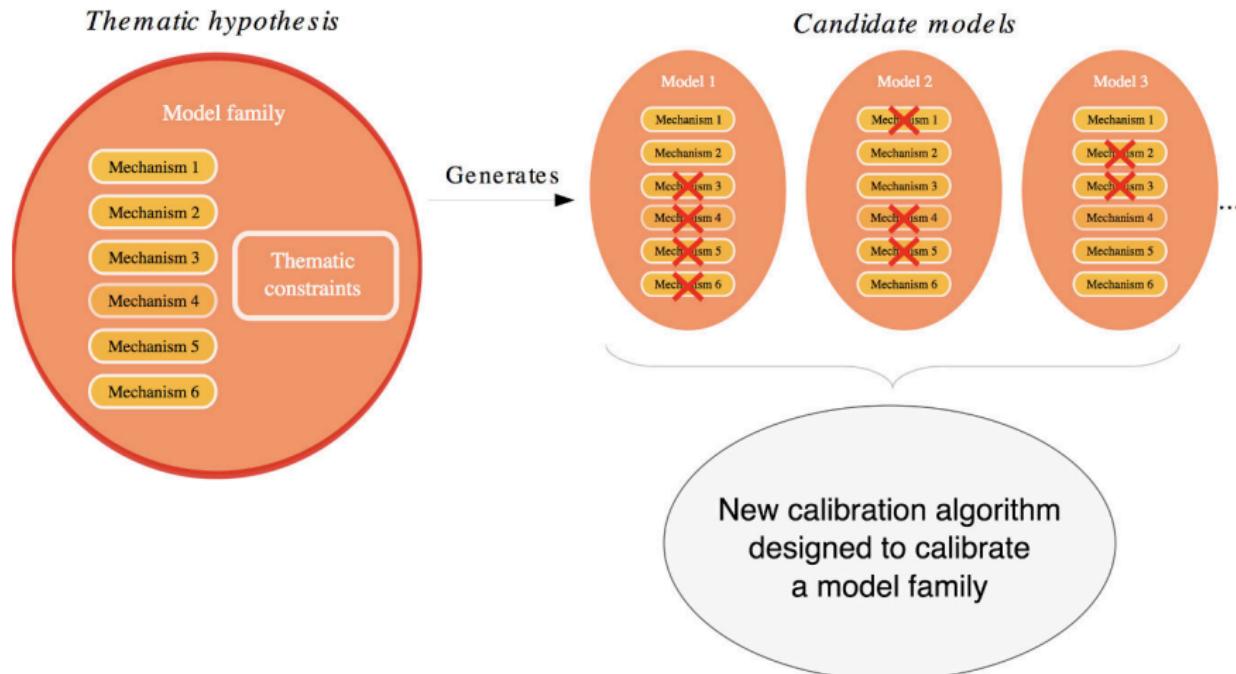
SimpopLocal et profil de calibration

Calcul de la meilleure calibration à pas fixés le long d'une dimension
[Reuillon et al., 2015]



Unicité des mécanismes

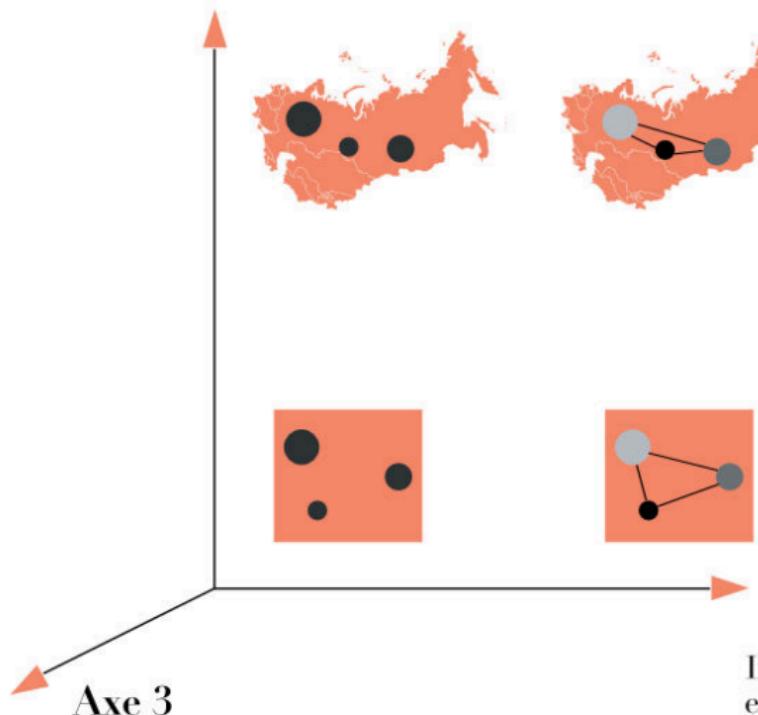
Automatisation de la confrontation entre hypothèses et mécanismes concurrents [Cottineau, 2014]



Multi-modélisation (64 modèles)

Axe 2

Interactions entre
les agents et
l'environnement

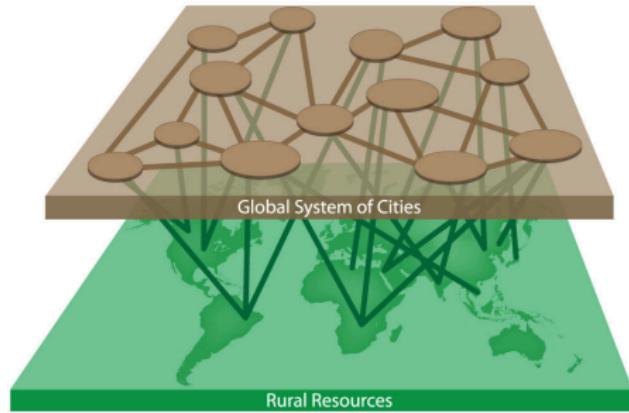


(c) Clémentine Cottineau, UMR Géographie-Cités, P.A.R.I.S., 2014

Exemple d'hypothèses concurrentes

Mécanisme d'échange : marché ou centralisé

Croissance urbaine : interactions interurbains ou contexte environnemental



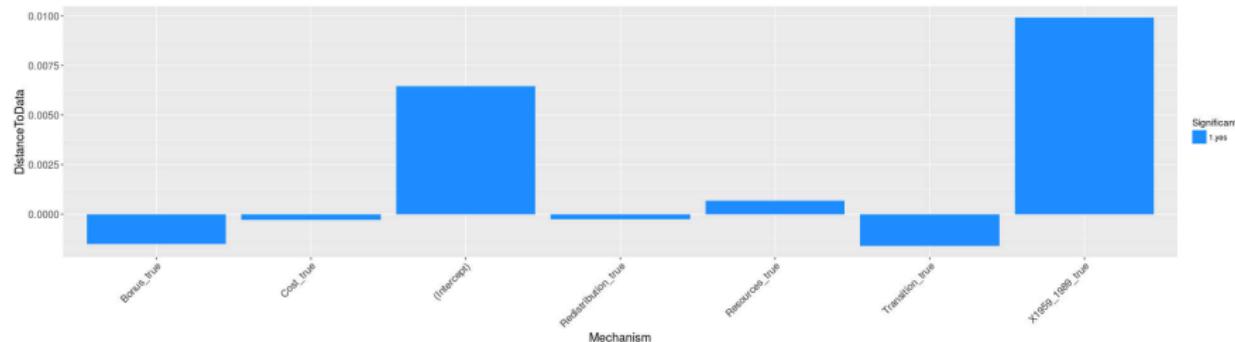
Calibration d'une famille de modèles

Calcul des paramètres optimaux pour l'ensemble des 64 modèles.

Contribution of mechanisms to the quality of simulation (closeness to data)

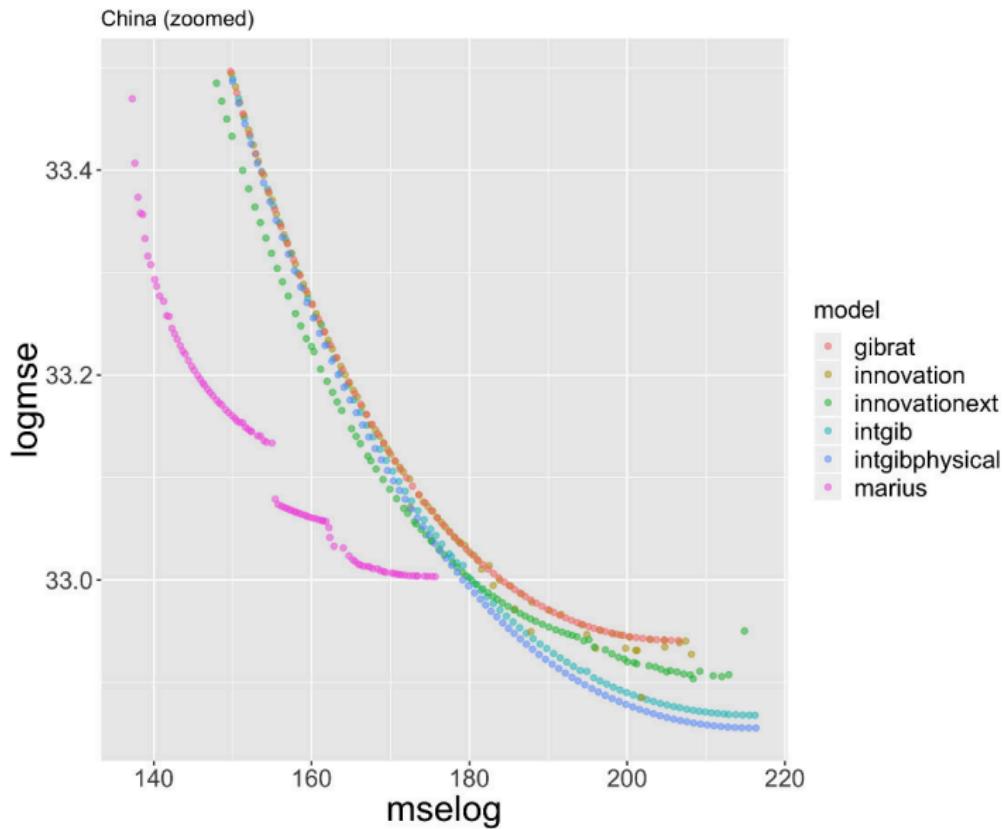
Models with different combination of mechanisms have been calibrated intensively against empirical data, using generic algorithms for more than 100000 generations. This plot shows the results of a regression explaining one measure of the quality of models (a small difference between simulated and empirical urban trajectories) by their mechanisms composition (the fact that any of the supplementary mechanisms is activated or not). Each bar represents the value of the estimated coefficient for each activated mechanism, in comparison with the same model structure without this mechanism, everything else being equal.

Statistical Significance (% of error)



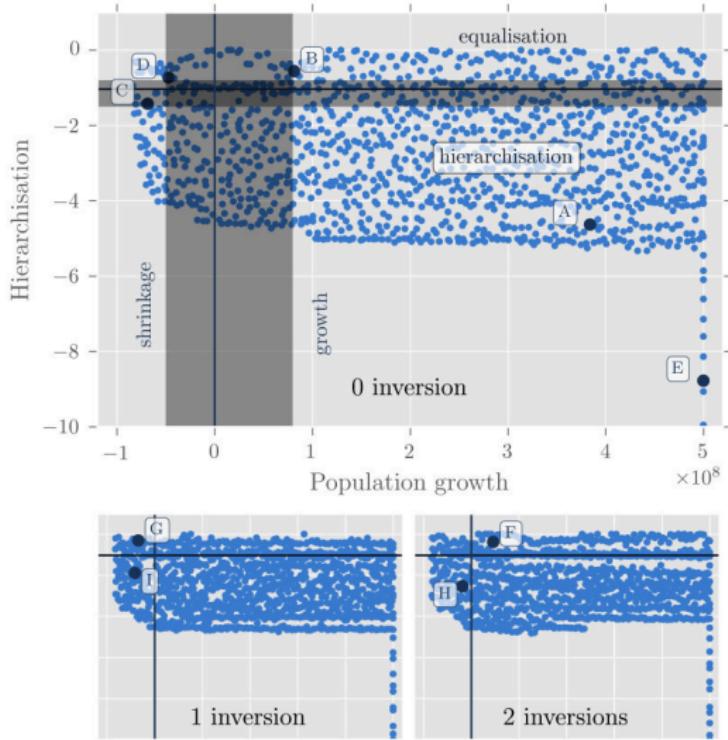
Autre exemple de multi-modélisation

Comparaison des modèles dynamiques pour les systèmes de villes
[Raimbault et al., 2020a]



Modèle MARIUS et diversité des sorties

Diversité des dynamiques urbaines obtenues par l'algorithme PSE
[Chérel et al., 2015]



Modèle macroscopique d'interactions

Contexte : extension des modèles d'interaction pour les systèmes de villes en incluant le réseau de transport physique

→ hypothèses du modèle de Gibrat, i.e. $\text{Cov}[P_i(t), P_j(t)] = 0$. Si $\vec{P}(t+1) = R \cdot \vec{P}(t)$ et R est aussi indépendant, alors $\mathbb{E}[\vec{P}(t+1)] = \mathbb{E}[R] \cdot \mathbb{E}[\vec{P}](t)$.

→ Avec $\vec{\mu}(t) = \mathbb{E}[\vec{P}(t)]$, l'approche est généralisée en prenant $\vec{\mu}(t+1) = f(\vec{\mu}(t))$

Modèle macroscopique d'interactions

Soit $\vec{\mu}(t) = \mathbb{E}[\vec{P}(t)]$ populations des villes et (d_{ij}) une matrice de distances

Le modèle est spécifié par

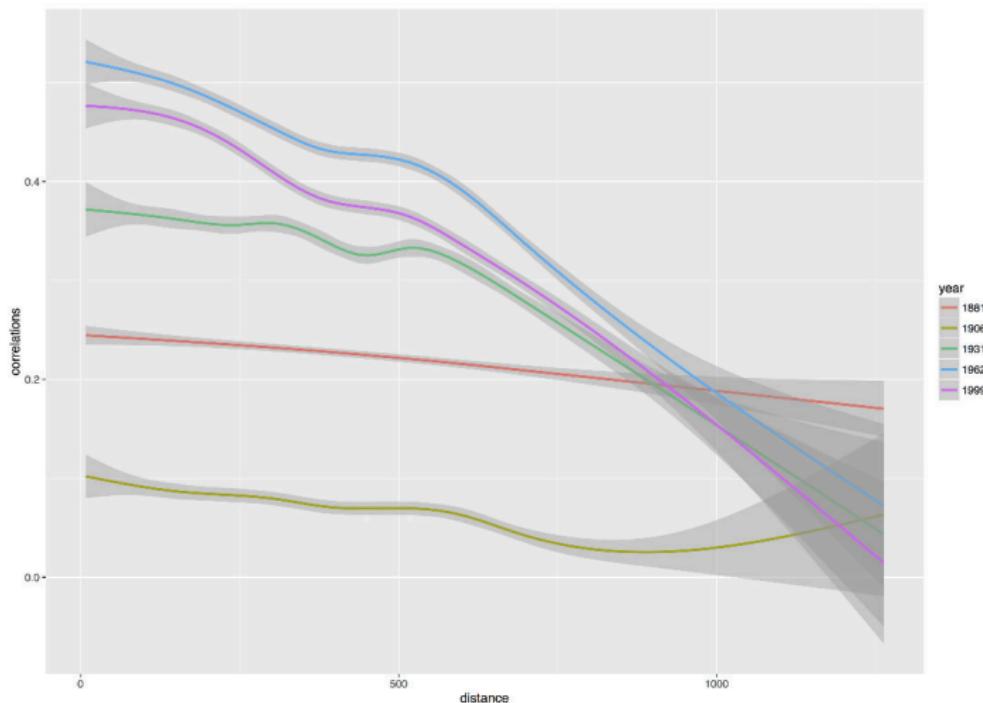
$$f(\vec{\mu}) = r_0 \cdot \text{Id} \cdot \vec{\mu} + G \cdot \mathbf{1} + N$$

avec

- $G_{ij} = w_G \cdot \frac{V_{ij}}{\langle V_{ij} \rangle}$ et $V_{ij} = \left(\frac{\mu_i \mu_j}{\sum \mu_k^2} \right)^{\gamma_G} \exp(-d_{ij}/d_G)$
- $N_i = w_N \cdot \sum_{kl} \left(\frac{\mu_k \mu_l}{\sum \mu} \right)^{\gamma_N} \exp(-d_{kl,i})/d_N$ avec $d_{kl,i}$ la distance au plus court chemin entre k, l calculé avec une impédance fixée par la topographie ($Z = (1 + \alpha/\alpha_0)^{n_0}$ avec $\alpha_0 \simeq 3$)

Données empiriques : faits stylisés

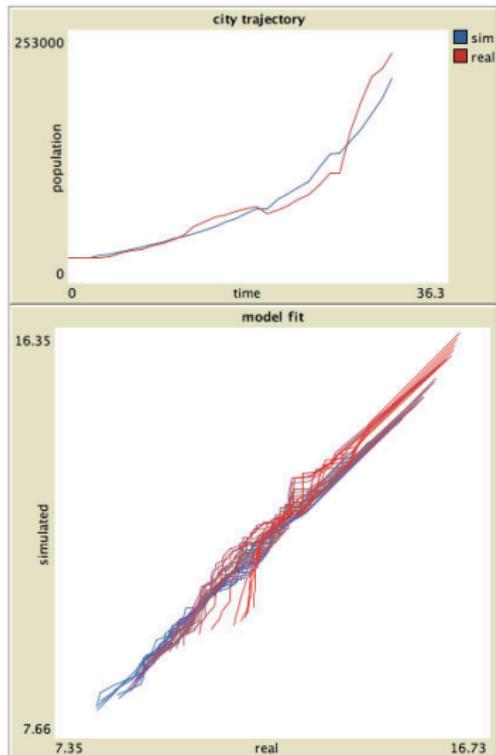
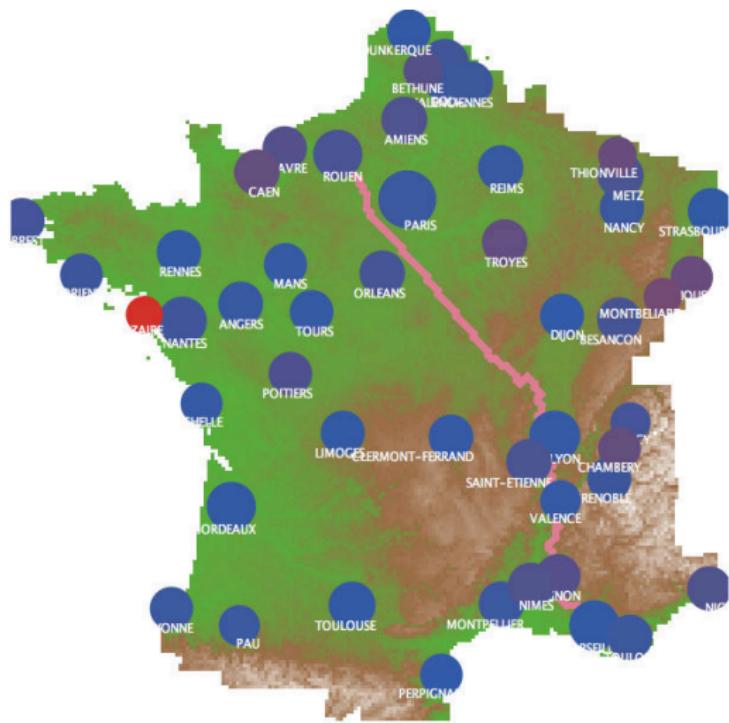
Données de population pour les villes Françaises (1831-1999)



Non-stationnarité des corrélations des log-returns comme fonction de la distance

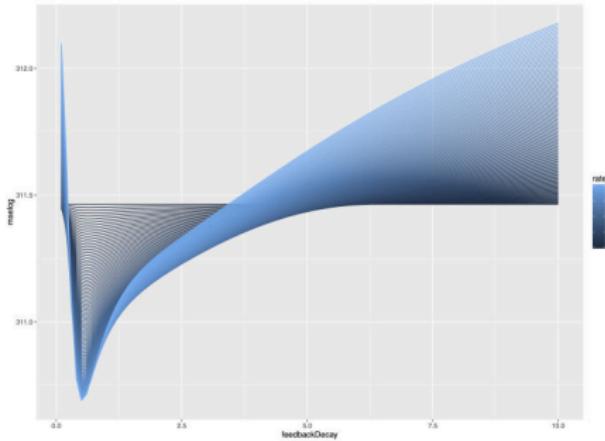
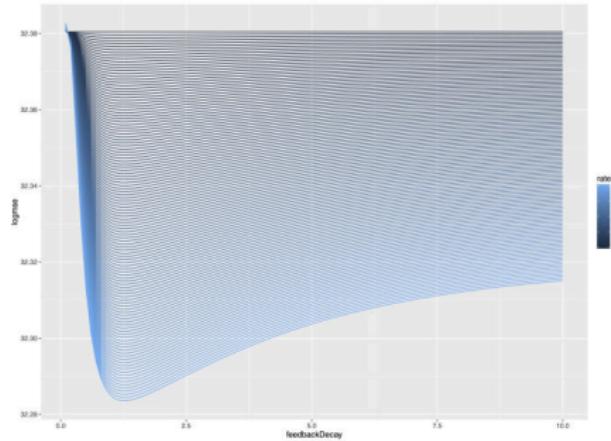
Réseau géographique abstrait

Réseau de transport physique abstrait par plus court chemins géographiques



Résultats : exploration du modèle

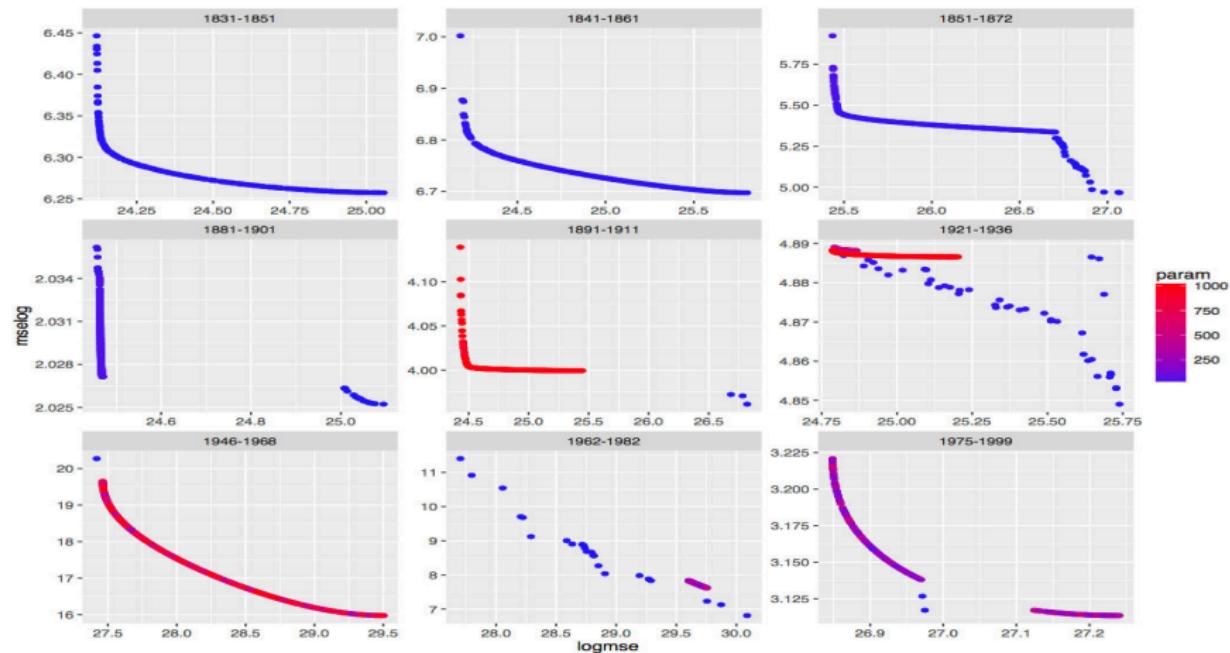
Effets du réseau physique : amélioration de l'ajustement par le processus de retroaction à interaction gravitaires fixes



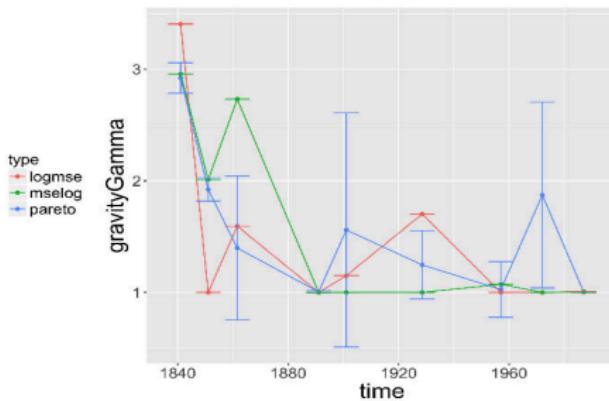
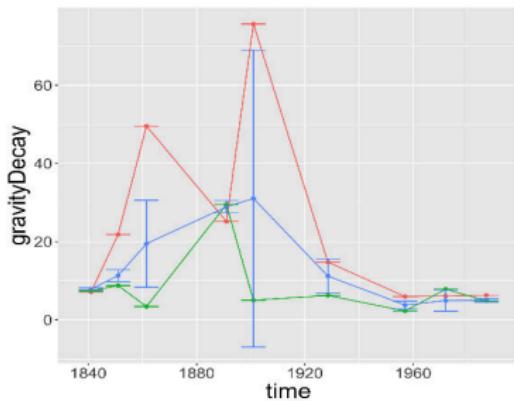
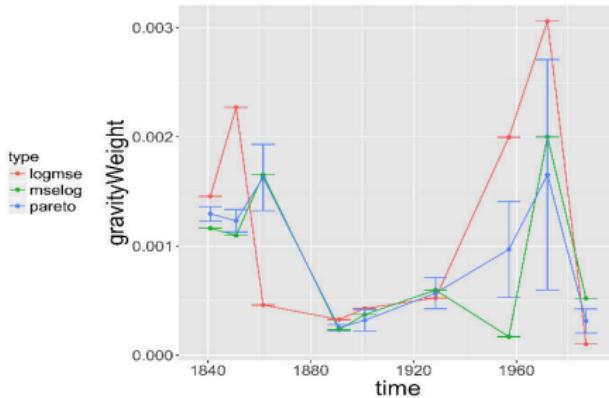
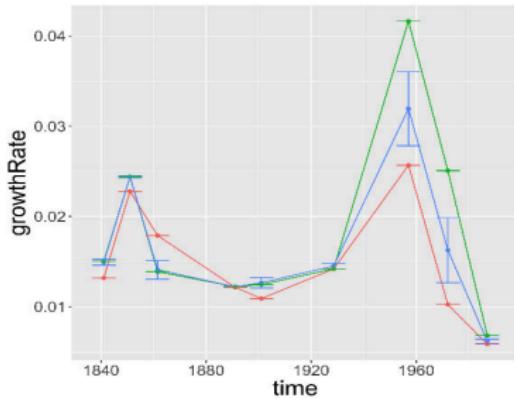
Résultats : calibration du modèle

Modèle calibré par algorithme génétique sur grille, avec le logiciel OpenMole [Reuillon et al., 2013]

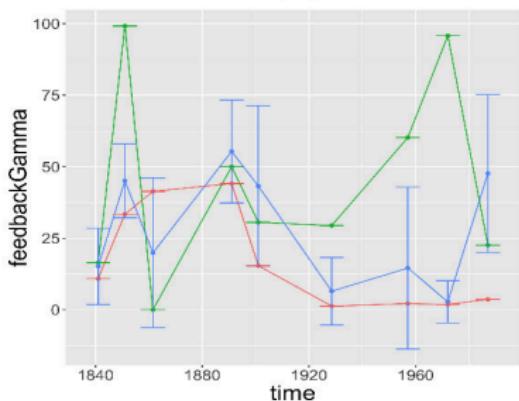
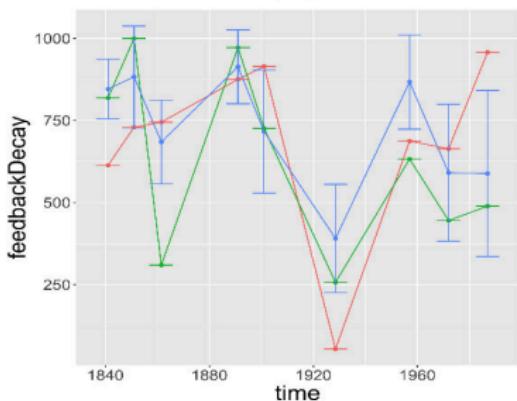
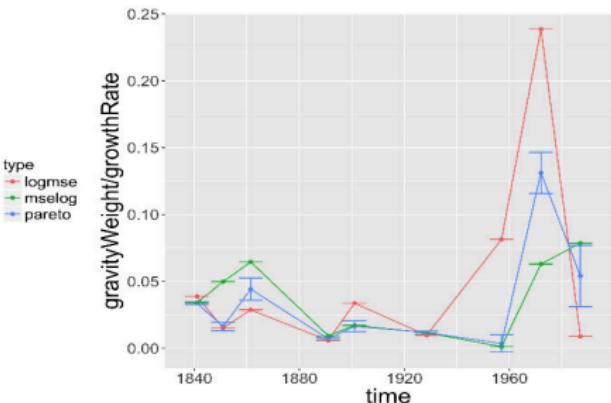
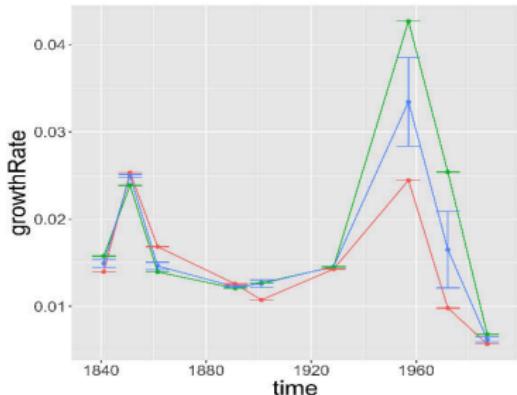
Fronts de Pareto pour la calibration du modèle complet, objectifs MSE and MSE sur les logarithmes



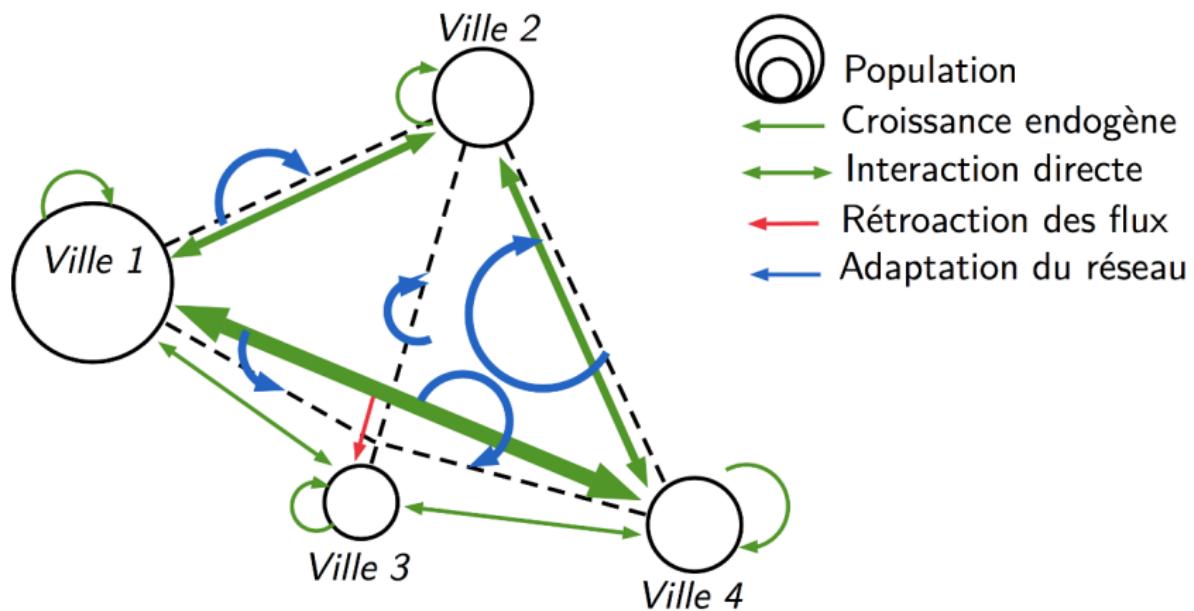
Résultats : calibration non-stationnaire du modèle gravitaire



Résultats : calibration non-stationnaire du modèle complet



Modèle macroscopique d'interaction



[Raimbault, 2020] [Raimbault, 2021]

Etant donné un flux ϕ dans un lien, la vitesse effective est mise à jour par

$$d(t+1) = d(t) \cdot \left(1 + g_{max} \cdot \left[\frac{1 - \left(\frac{\phi}{\phi_0} \right)^{\gamma_s}}{1 + \left(\frac{\phi}{\phi_0} \right)^{\gamma_s}} \right] \right)$$

avec γ_s paramètre de hiérarchie, ϕ_0 paramètre de seuil et g_{max} taux de croissance maximal (ajustable en calculant $(1 + g_{max})^{t_f}$).

Formalisation : indicateurs

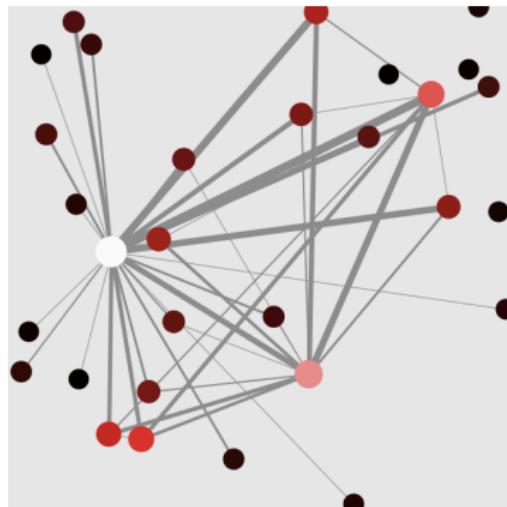
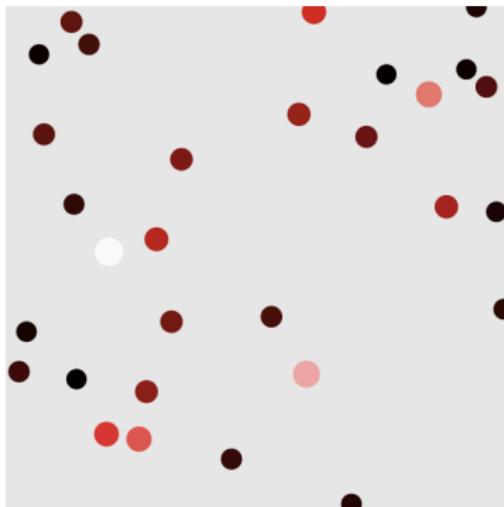
- Hiérarchie, entropie, statistiques dans le temps pour chaque variable
- Changements dans la hiérarchie (corrélation de rang) X :
 $\rho [X_i(t=0), X_i(t=t_f)]$
- Diversité de la trajectoire X : avec $\tilde{X}_i(t) \in [0; 1]$ renormalisé,

$$\frac{2}{N \cdot (N-1)} \sum_{i < j} \left(\frac{1}{T} \int_t \left(\tilde{X}_i(t) - \tilde{X}_j(t) \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}}$$

- Complexité des trajectoires (nombre de points d'inflexion)
- Corrélations en fonction de la distance
 $\hat{\rho}_d [(X(\vec{x}_1, Y(\vec{x}_2)) || |\vec{x}_1 - \vec{x}_2| \sim d]$
- Corrélations retardées $\hat{\rho}_\tau [\Delta X(t), \Delta Y(t - \tau)]$ (causalité de Granger)

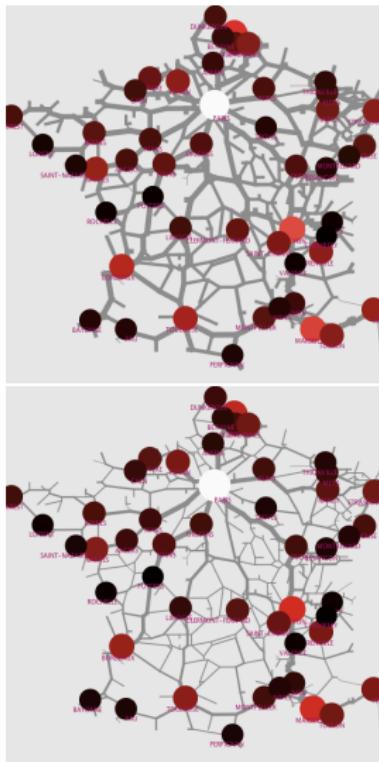
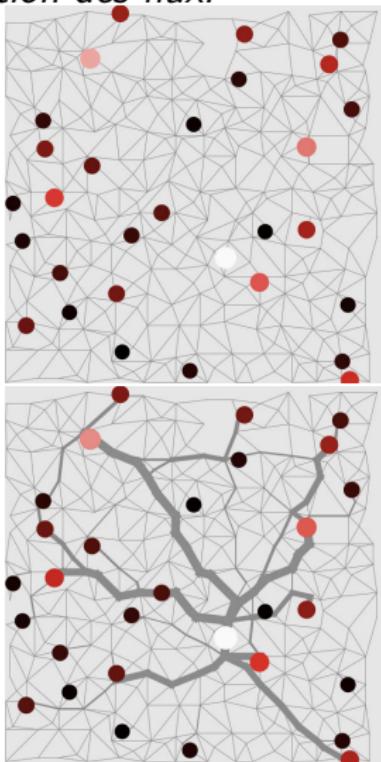
Spécification avec réseau abstrait

Réseau virtuel complet entre les villes, initialisé avec distances euclidiennes

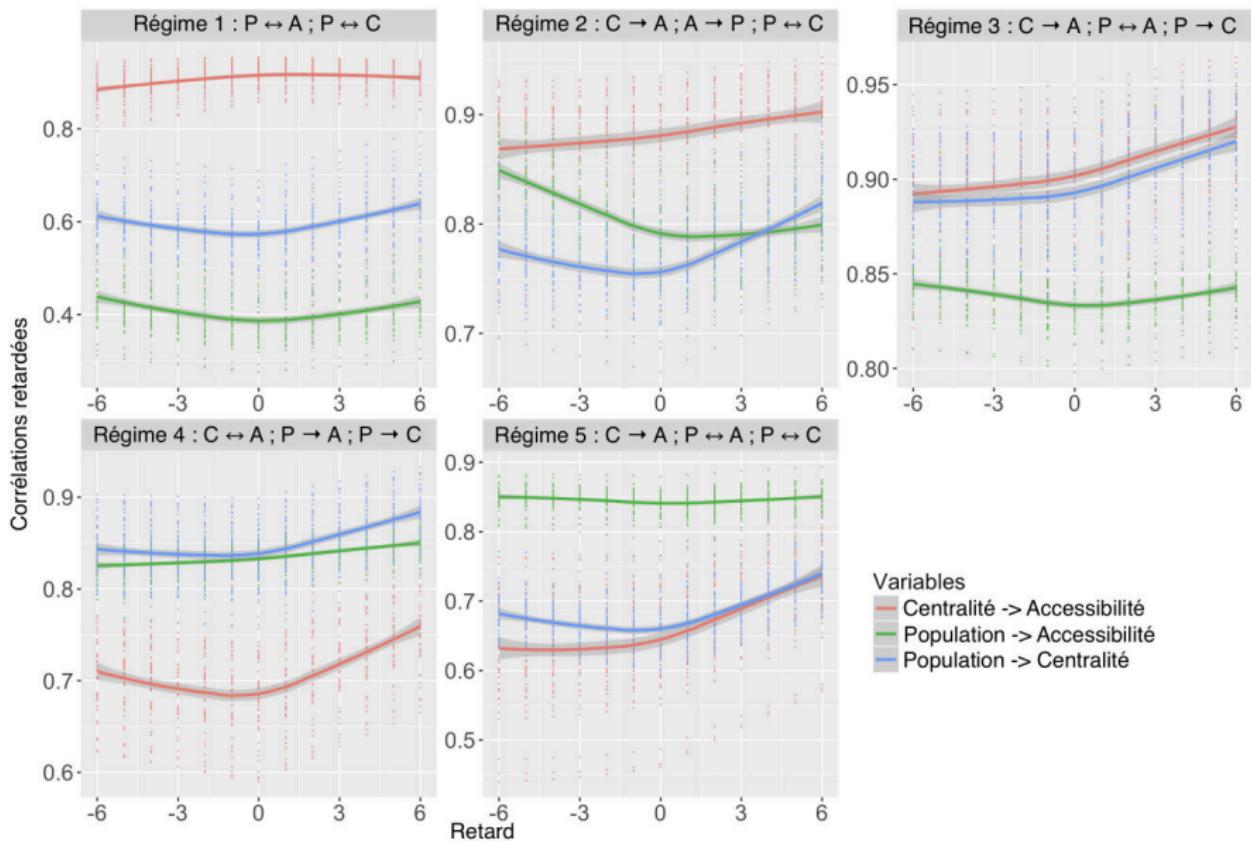


Spécification avec réseau physique

Réseau physique initial avec vitesses uniformes ; renforcement des vitesses en fonction des flux.



Résultats : régimes de co-évolution



Multiples régimes mis en évidence dans des configurations synthétiques

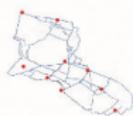
Modèles de transport et modèles urbains

- 1 Introduction
- 2 Diversité des modèles et applications
- 3 Modèles de mobilité: prévision de la demande de transport
- 4 Modèles d'interaction transport-usage du sol
- 5 Modèles de dynamiques urbaines
- 6 Modèles de morphogenèse urbaine
 - Morphogenèse biologique
 - Co-évolution réseaux territoires
 - Gouvernance des transports
- 7 Epistémologie des modèles de simulation

Morphogenèse des réseaux de transport

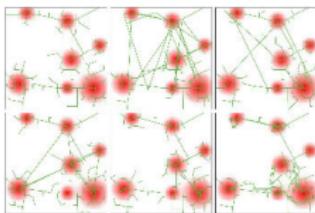
Variété des approches possibles

Réseau



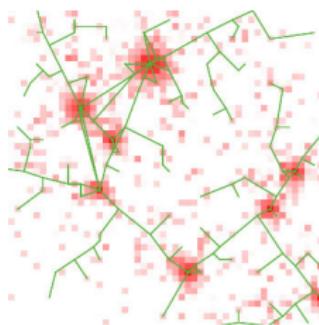
Réseau biologique
auto-organisé

Optimisation



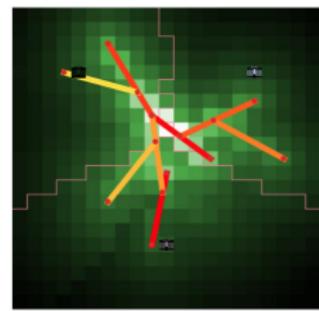
Multi-modélisation
Explication

Co-évolution



Co-évolution

Explication



Gouvernance des
transports

Explication

Modèles de transport et modèles urbains

- ① Introduction
- ② Diversité des modèles et applications
- ③ Modèles de mobilité: prévision de la demande de transport
- ④ Modèles d'interaction transport-usage du sol
- ⑤ Modèles de dynamiques urbaines
- ⑥ Modèles de morphogenèse urbaine
 - Morphogenèse biologique
 - Co-évolution réseaux territoires
 - Gouvernance des transports
- ⑦ Epistémologie des modèles de simulation

[Tero et al., 2010] : exploration et renforcement par une moisissure à la recherche de ressources

Modèle :

- Réseau initial homogène de tubes ij de longueur L_{ij} , de diamètre variable D_{ij} , traversé par un flux Q_{ij} .
- Noeuds i avec pression p_i .
- N noeuds sont des origines/destinations, aléatoirement à chaque étape l'un est source $p_{i+} = I_0$ et l'autre puit $p_{i-} = -I_0$

Evolution du réseau

À chaque itération :

- ➊ Détermination des flux par loi de Kirchoff (analogie électrostatique) :

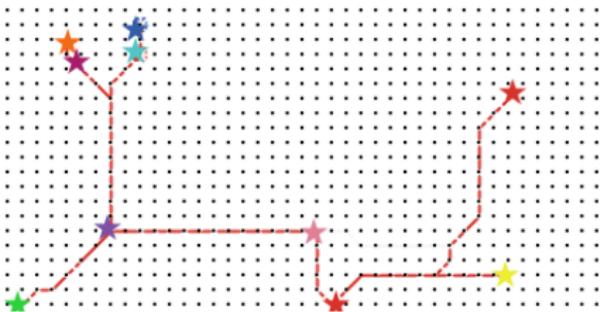
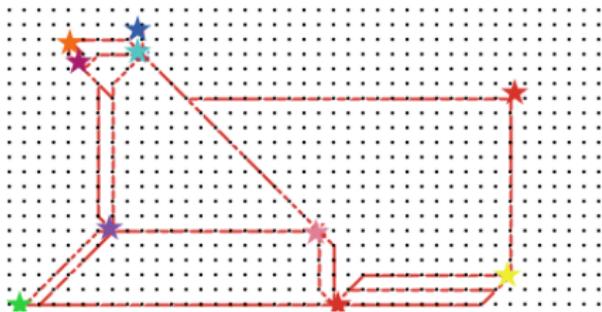
loi d'Ohm $Q_{ij} = \frac{D_{ij}}{L_{ij}} \cdot (p_i - p_j)$ et conservation des flux

$$\sum_{j \rightarrow i} Q_{ij} = 0, \sum_{j \rightarrow i_{\pm}} Q_{i_{\pm}j} = \pm I_0$$

- ➋ Évolution des diamètres (γ paramètre de renforcement) par

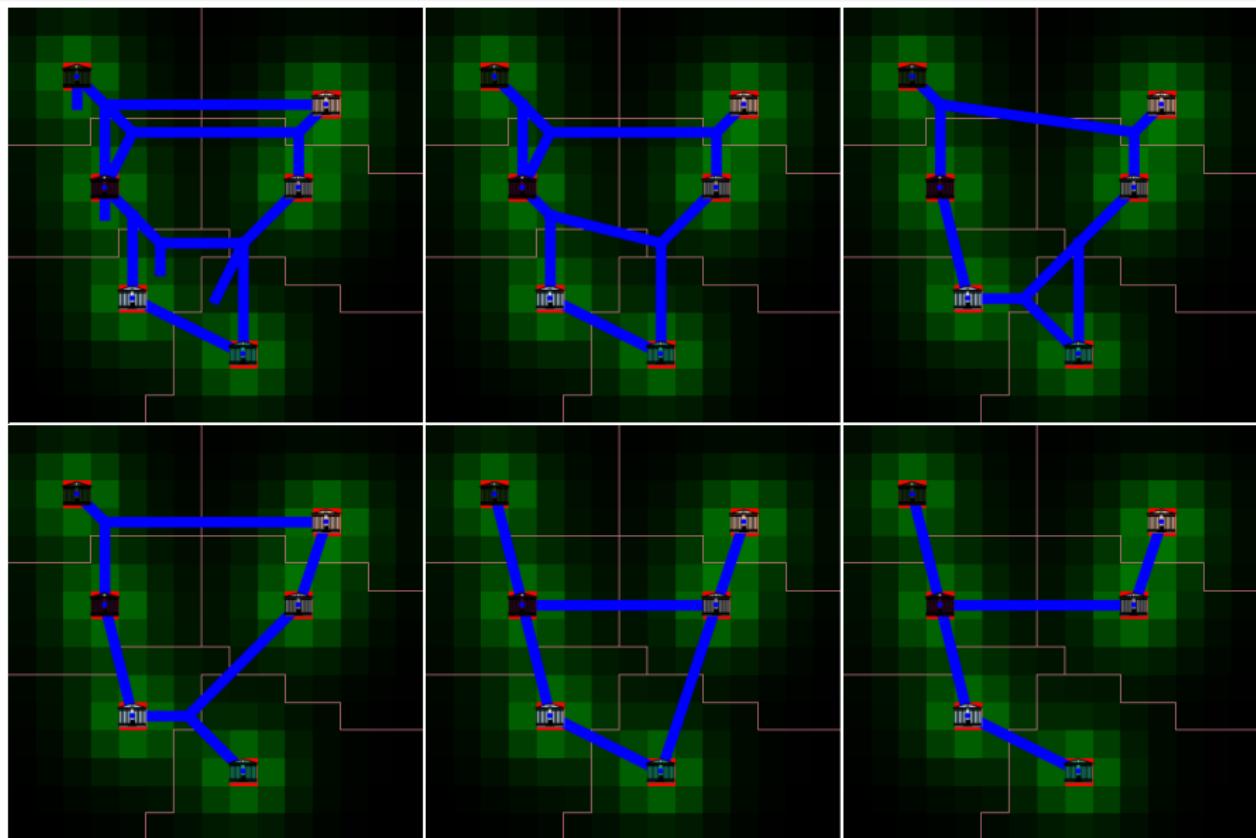
$$\frac{dD_{ij}}{dt} = \frac{|Q_{ij}|^\gamma}{1 + |Q_{ij}|^\gamma} - D_{ij}$$

Exemples de réseaux



Sensibilité de la topologie du réseau à γ . Gauche : $\gamma \sim 1$, réseau robuste.
Droite : $\gamma \gg 1$, réseau arborescent.

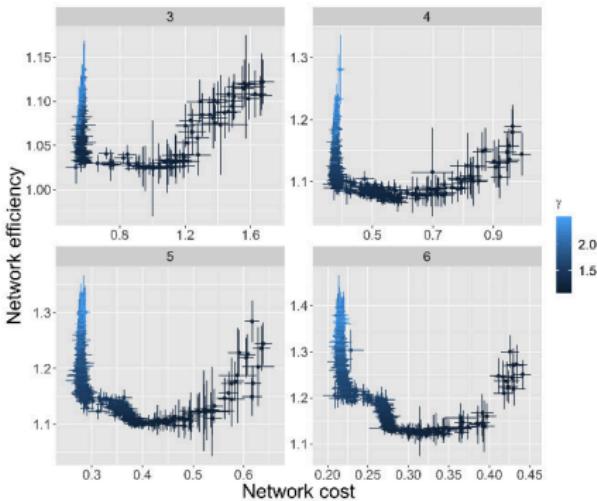
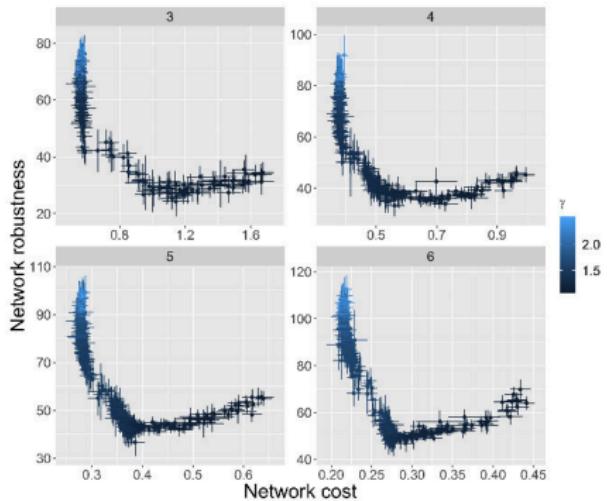
Application à la génération de réseaux



[Raimbault, 2018c]

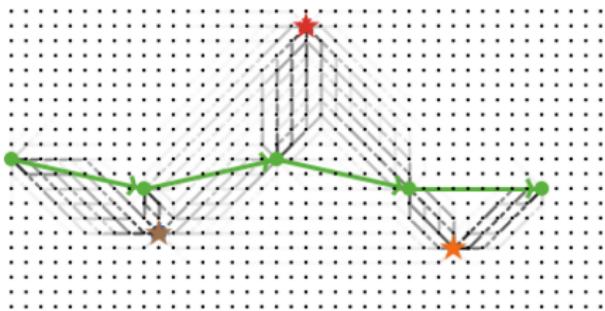
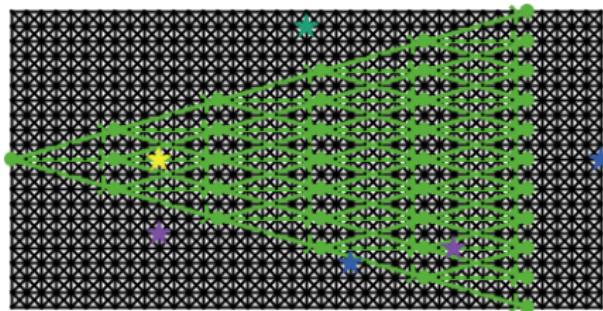
Optimalité des réseaux générés

Fronts de Pareto pour les indicateurs de coût, robustesse, efficacité.

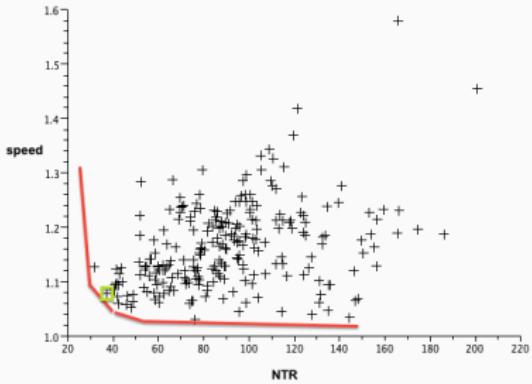
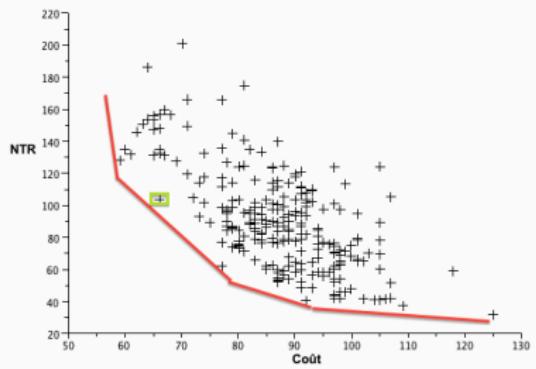


Application : corridor de transport optimal

→ exploration heuristique d'un ensemble arborescent d'infrastructures potentielles

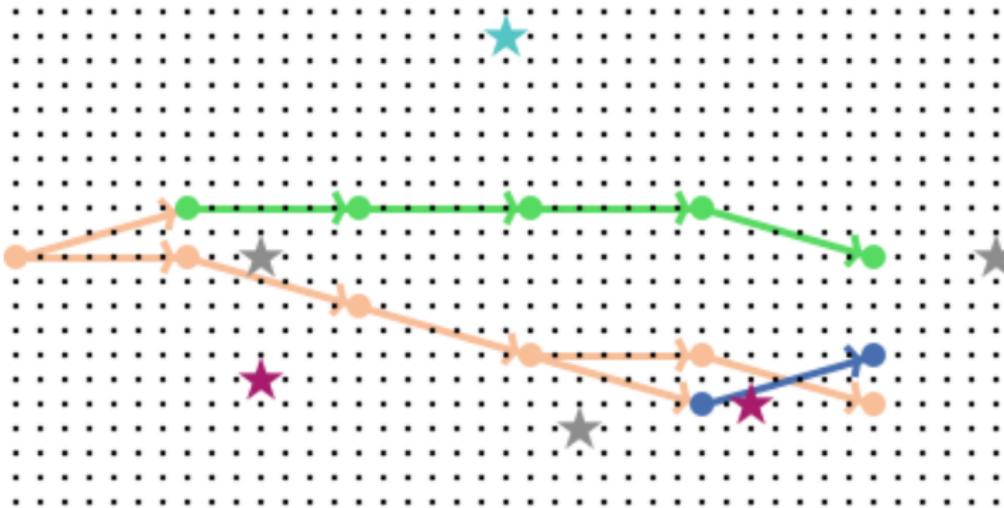


Optimisation de Pareto



Optimisation de Pareto : points de compromis sur le front pour les objectifs contradictoires.

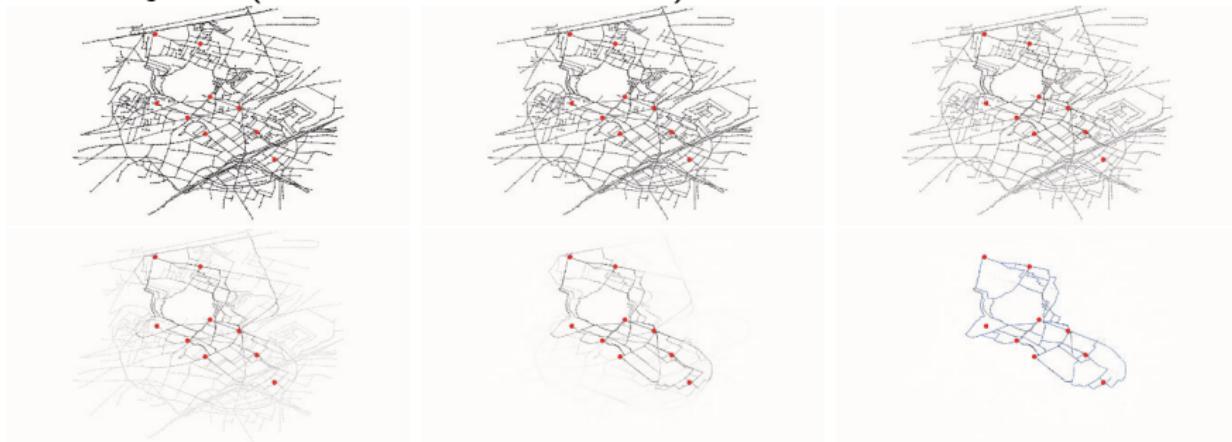
Optimisation de Pareto



Configurations pour les points optimaux sélectionnés.

Application : réseau optimal

→ problème NP-difficile similaire à un voyageur de commerce mais multi-objectif (coût, vitesse, robustesse).



Convergence progressive du réseau vers un réseau optimal connectant les points fixés (en rouge), à partir du réseau de rues.

- 1 Introduction
- 2 Diversité des modèles et applications
- 3 Modèles de mobilité: prévision de la demande de transport
- 4 Modèles d'interaction transport-usage du sol
- 5 Modèles de dynamiques urbaines
- 6 Modèles de morphogenèse urbaine
 - Morphogenèse biologique
 - Co-évolution réseaux territoires
 - Gouvernance des transports
- 7 Epistémologie des modèles de simulation

Modèle simple de reaction-diffusion

- Role crucial de l'interaction entre forces de concentration et de dispersion [Fujita and Thisse, 1996] pour les systèmes urbains hors-équilibre
- Mécanismes d'agrégation (Simon model e.g.) produisent des lois puissance [Dodds et al., 2017]
- Lien entre morphogenèse et équations de réaction-diffusion [Turing, 1990]
- Extension d'un model de type *Diffusion-limited aggregation* introduit par [Batty, 1991], avec les processus abstraits d'agrégation et de diffusion de la population

[Raimbault, 2018a]

Formalisation du modèle

- Environnement de grille avec population des cellules $(P_i(t))_{1 \leq i \leq N^2}$.
- À chaque pas de temps:
 - ➊ La population s'accroît à un taux exogène N_G , attribuée de manière indépendante aux cellules suivant un attachement préférentiel d'intensité α

$$\mathbb{P}[P_i(t+1) = P_i(t)+1 | P(t+1) = P(t)+1] = \frac{(P_i(t)/P(t))^\alpha}{\sum(P_j(t)/P(t))^\alpha} \quad (1)$$

- ➋ La population est diffusée n_d fois avec une intensité β
- Critère d'arrêt : population totale fixée P_m .

Indicateurs morphologiques

- ① Pente rang-taille γ , donnée par $\ln(P_{\tilde{i}}/P_0) \sim k + \gamma \cdot \ln(\tilde{i}/i_0)$
- ② Entropie de la distribution:

$$\mathcal{E} = \sum_{i=1}^M \frac{P_i}{P} \cdot \ln \frac{P_i}{P} \quad (2)$$

- ③ Autocorrelation spatiale donnée par l'indice de Moran, avec $w_{ij} = 1/d_{ij}$

$$I = M \cdot \frac{\sum_{i \neq j} w_{ij} (P_i - \bar{P}) \cdot (P_j - \bar{P})}{\sum_{i \neq j} w_{ij} \sum_i (P_i - \bar{P})^2}$$

- ④ Distance moyenne entre individus

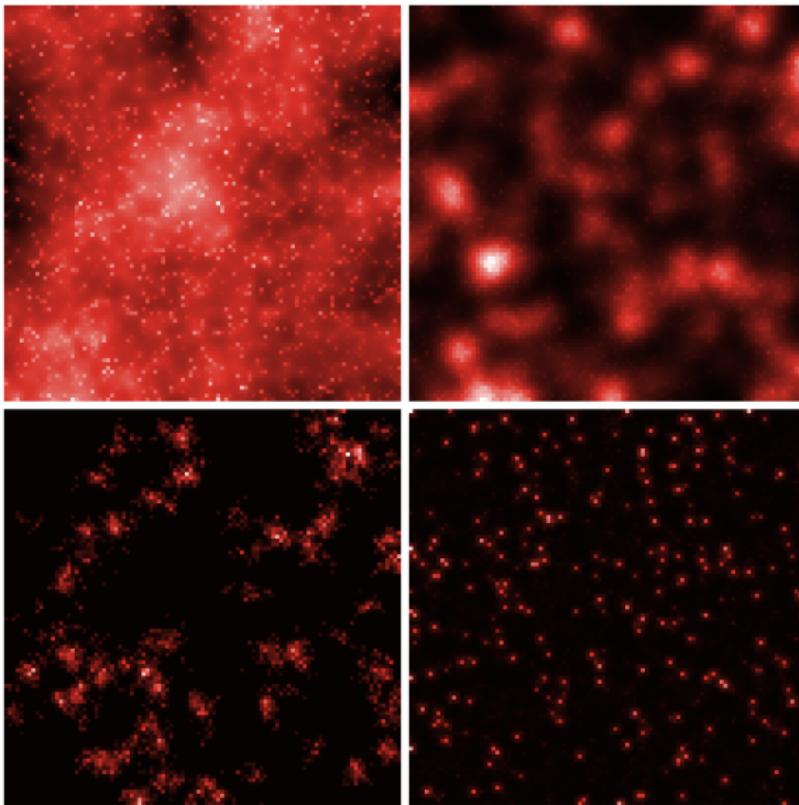
$$\bar{d} = \frac{1}{d_M} \cdot \sum_{i < j} \frac{P_i P_j}{P^2} \cdot d_{ij}$$

Classification du modèle

Le modèle en une dimension vérifie l'équation aux dérivées partielles:

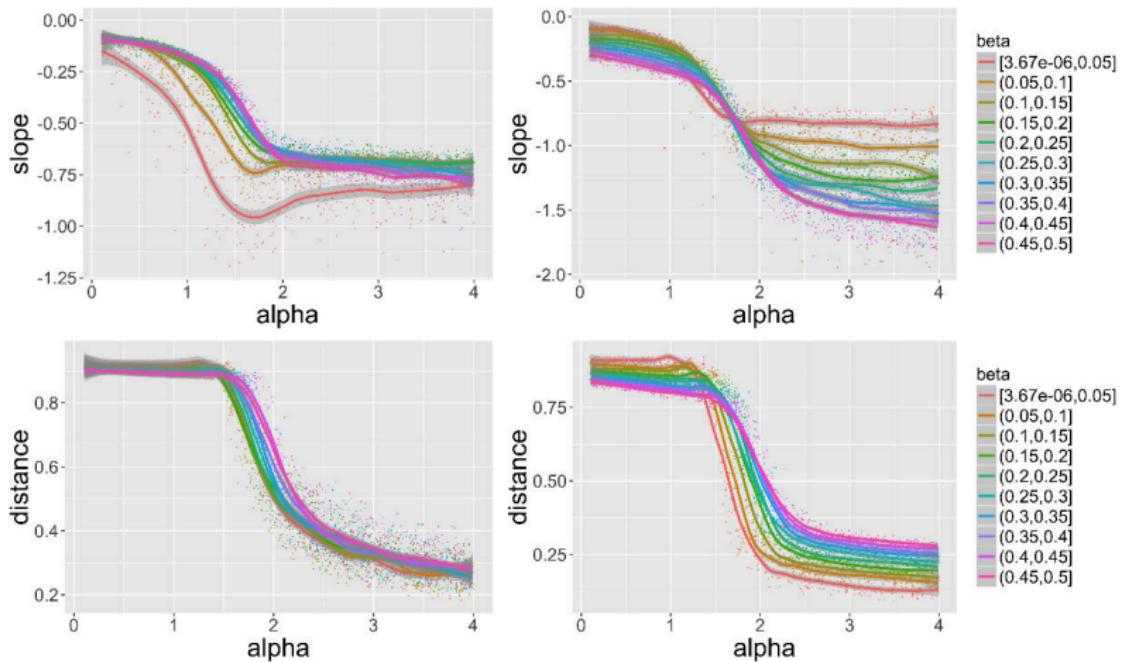
$$\delta_t \cdot \frac{\partial p}{\partial t} = \frac{N_G \cdot p^\alpha}{P_\alpha(t)} + \frac{\alpha \beta (\alpha - 1) \delta x^2}{2} \cdot \frac{N_G \cdot p^{\alpha-2}}{P_\alpha(t)} \cdot \left(\frac{\partial p}{\partial x} \right)^2 \\ + \frac{\beta \delta x^2}{2} \cdot \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} \cdot \left[1 + \alpha \frac{N_G p^{\alpha-1}}{P_\alpha(t)} \right] \quad (3)$$

Génération de distributions de population



Exemples de configurations territoriales générées

Comportement du modèle



Transitions de phase des indicateurs montrées par l'exploration de l'espace des paramètres (80000 points, 10 répétitions pour chaque)

Dépendance au chemin

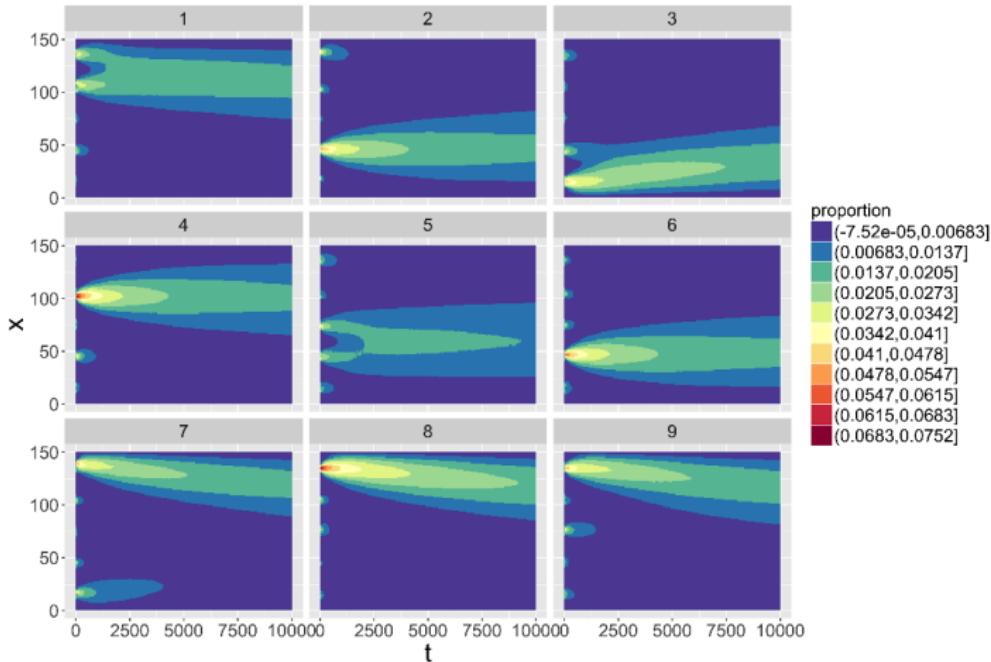
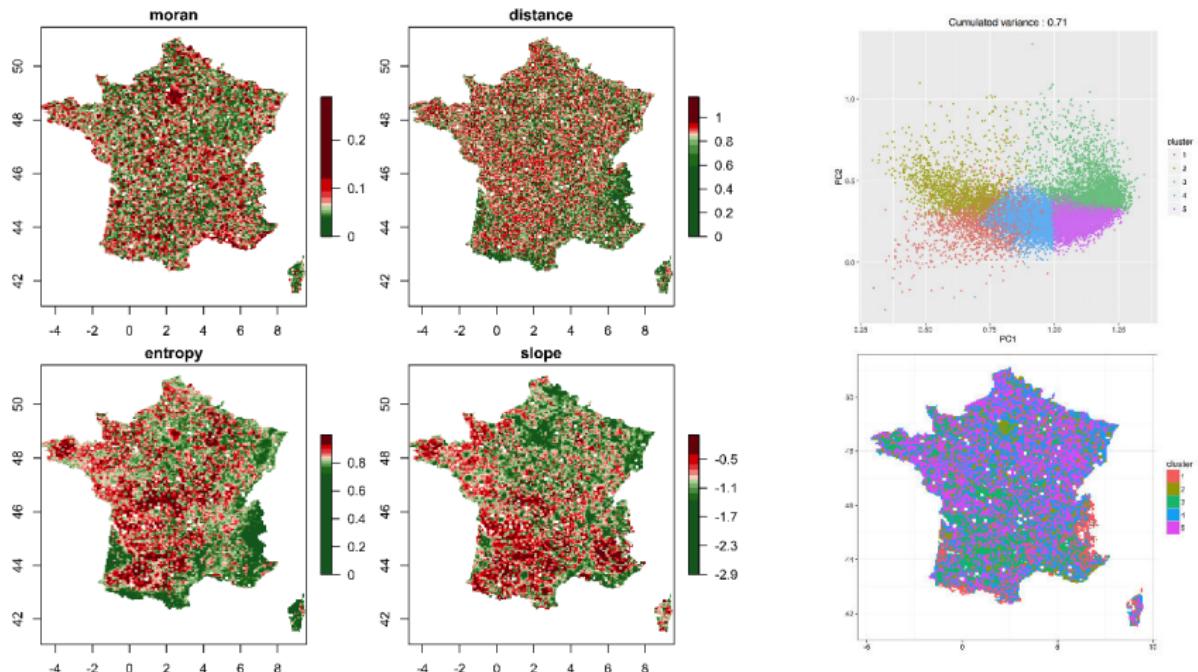


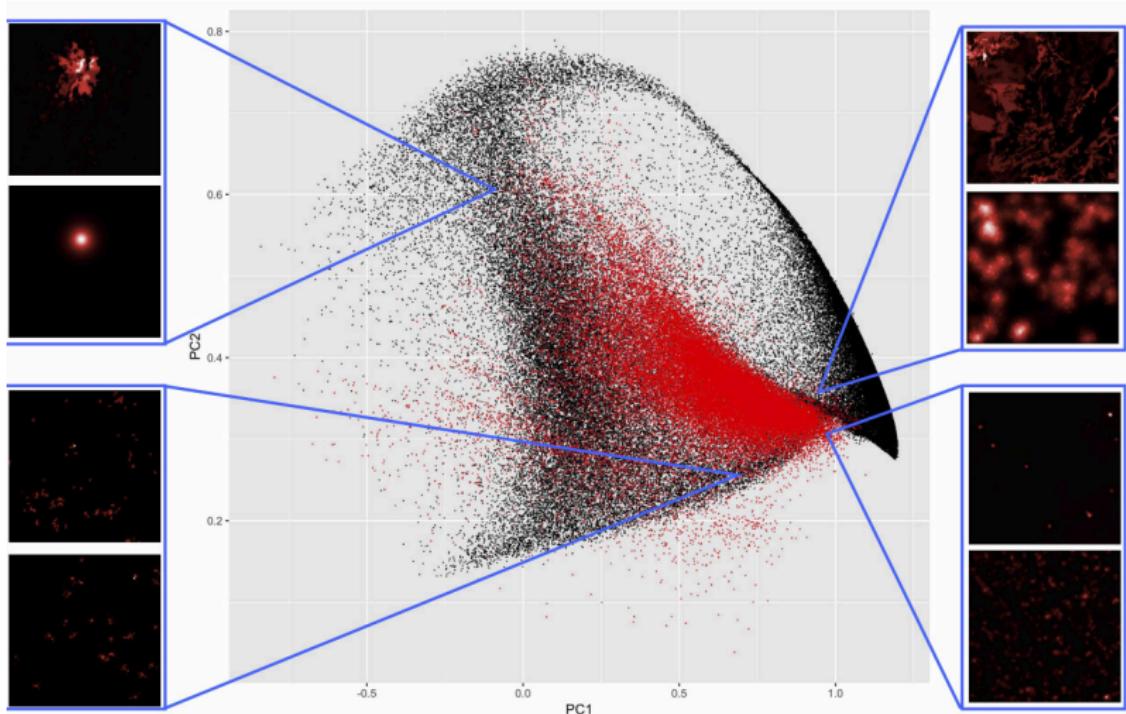
Illustration de la dépendance au chemin pour une version simplifiée unidimensionnelle du modèle : trajectoires des cellules dans le temps pour 9 répétitions à partir de la même condition initiale.

Données empiriques

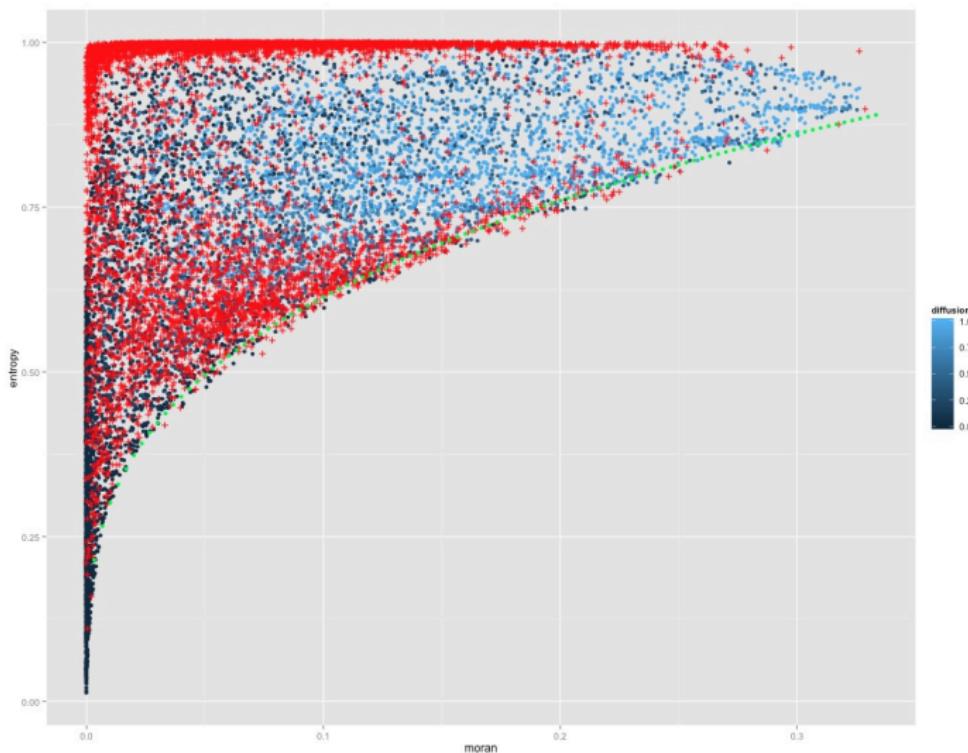


Calcul des indicateurs morphologiques pour la densité de population pour l'Europe.

Calibration du modèle



Exploration ciblée du modèle



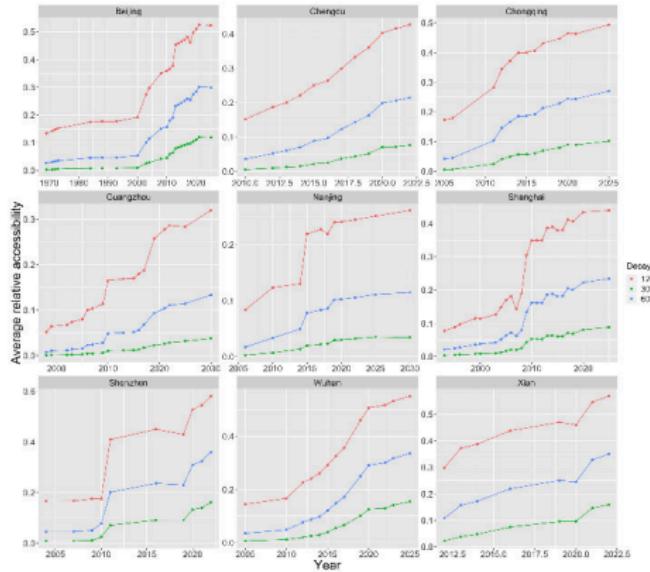
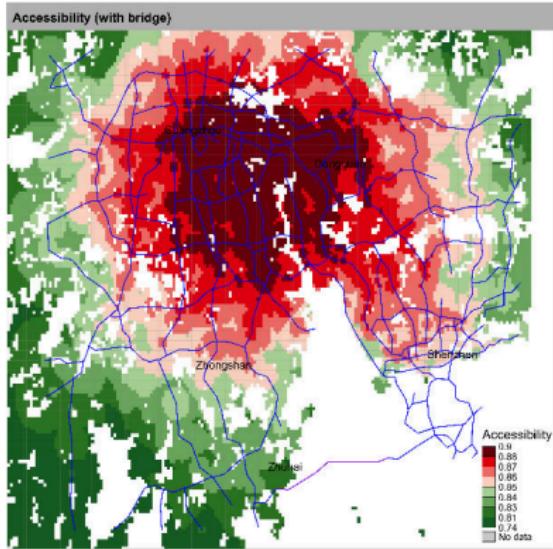
*Application d'un algorithme évolutionnaire de recherche de diversité
[Chérel et al., 2015]*

Inclure des processus plus complexes ?

Quelle ontologie pour inclure des propriétés fonctionnelles plus complexes ?

- Systèmes territoriaux comme le couplage fort entre territoires et réseaux (potentiels et réalisés) [Dupuy, 1987].
- Les réseaux capturent les notions fonctionnelles de centralités et d'accessibilité.

Interactions entre réseaux et territoires



Evolution des motifs d'accessibilité comme un aspect des dynamiques de co-évolution.

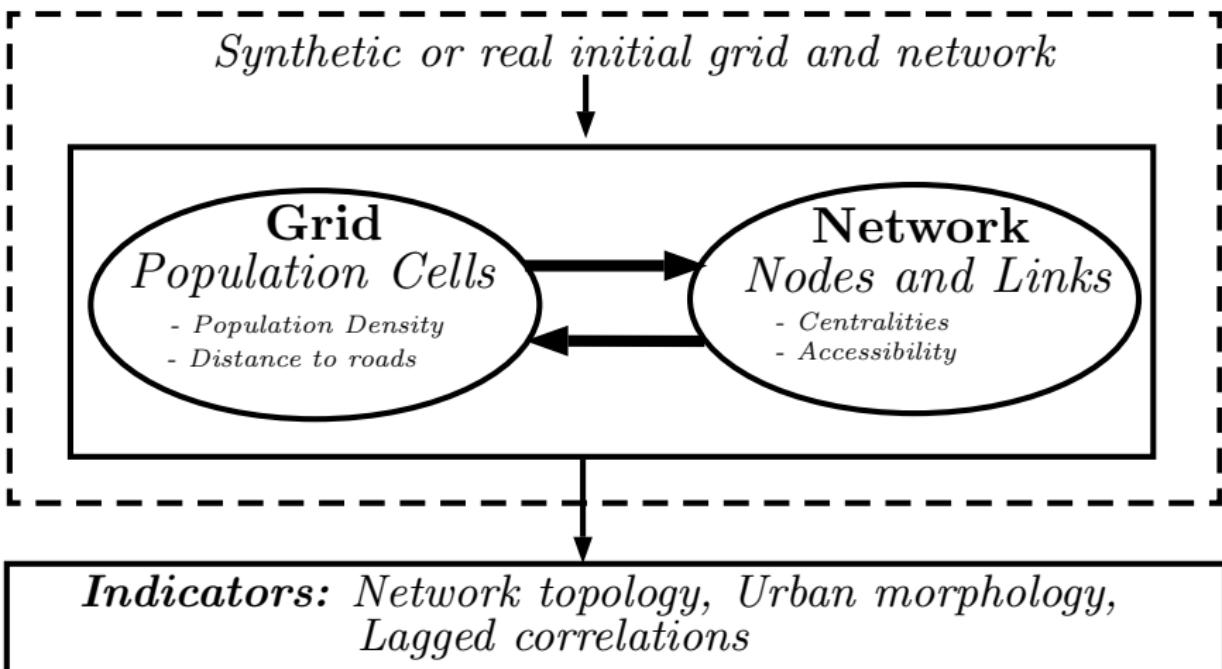
[Raimbault, 2019a]

Un modèle de morphogenèse pour la co-évolution

- Couplage de la distribution de la population au réseau de transport, suivant la logique de [Raimbault et al., 2014]
- Les variables morphologiques et fonctionnelles locales déterminent une utilité, qui est utilisée dans l'attachement préférentiel
- La croissance du réseau suit différentes heuristiques (multi-modélisation)

[Raimbault, 2019b] [Raimbault, 2018d]

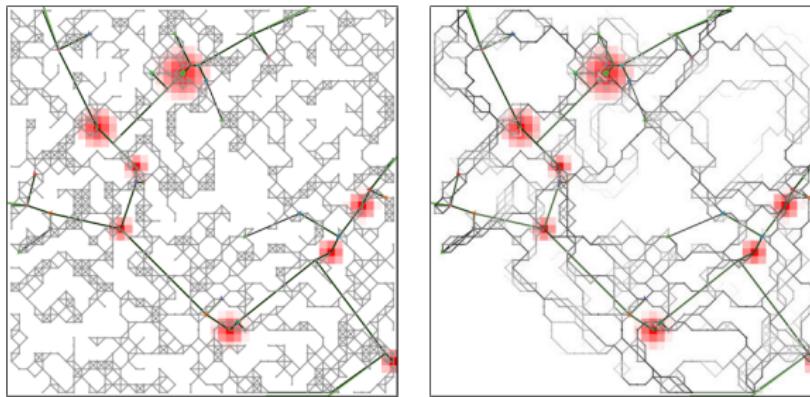
Spécification du modèle



Evolution du réseau

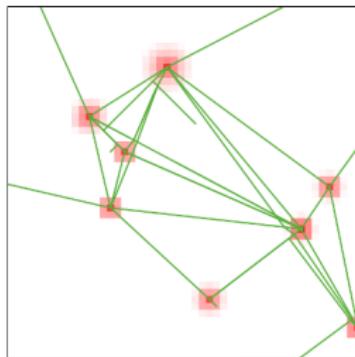
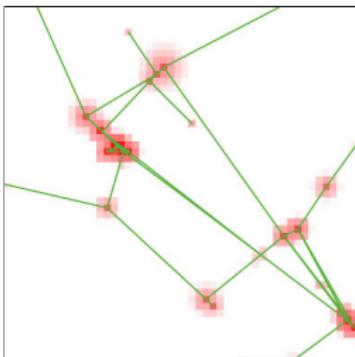
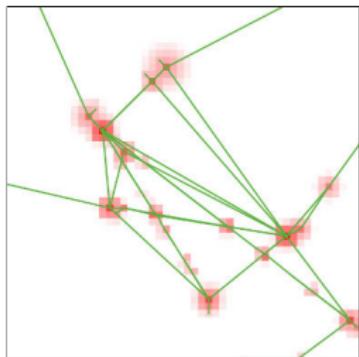
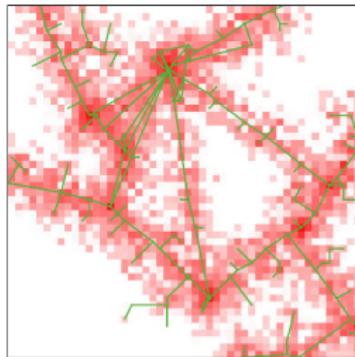
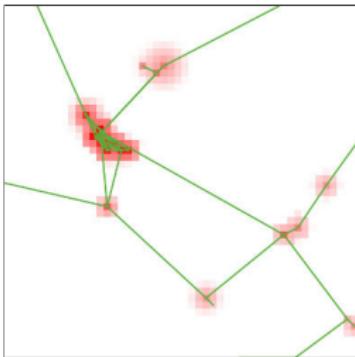
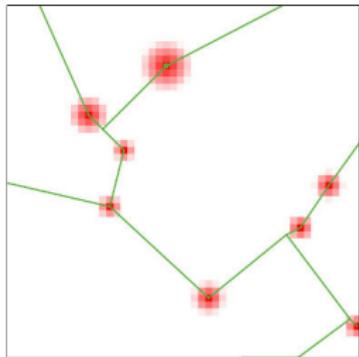
À pas de temps fixes :

- ① Ajout de nouveau noeuds préférentiellement à la population, connexion directe.
- ② Ajout de nouveaux liens, suivant une heuristique parmi : aucune, aléatoire, rupture de potentiel gravitaire, rupture aléatoire de potentiel gravitaire [Schmitt, 2014], coûts-bénéfices [Louf et al., 2013], génération de réseau biologique [Tero et al., 2010]



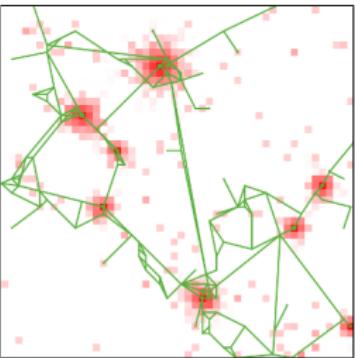
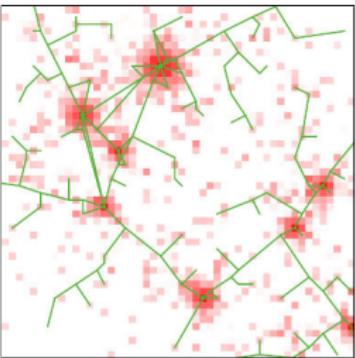
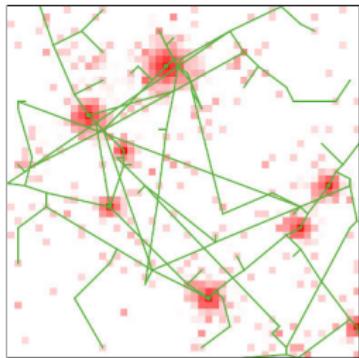
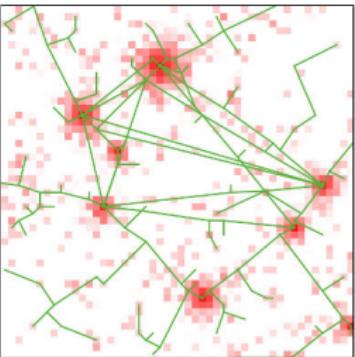
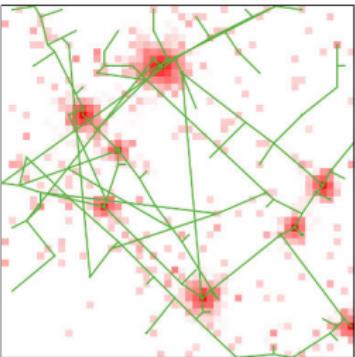
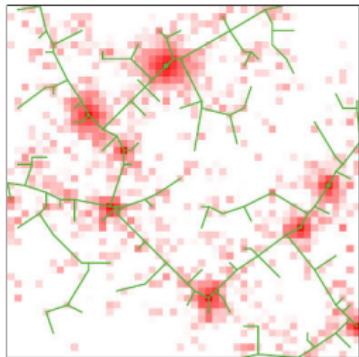
Etape intermédiaire pour la génération de réseau biologique

Formes urbaines générées



Dans l'ordre: état initial; accessibilité; distance au réseau; centralité d'intermédiairité; centralité de proximité; population.

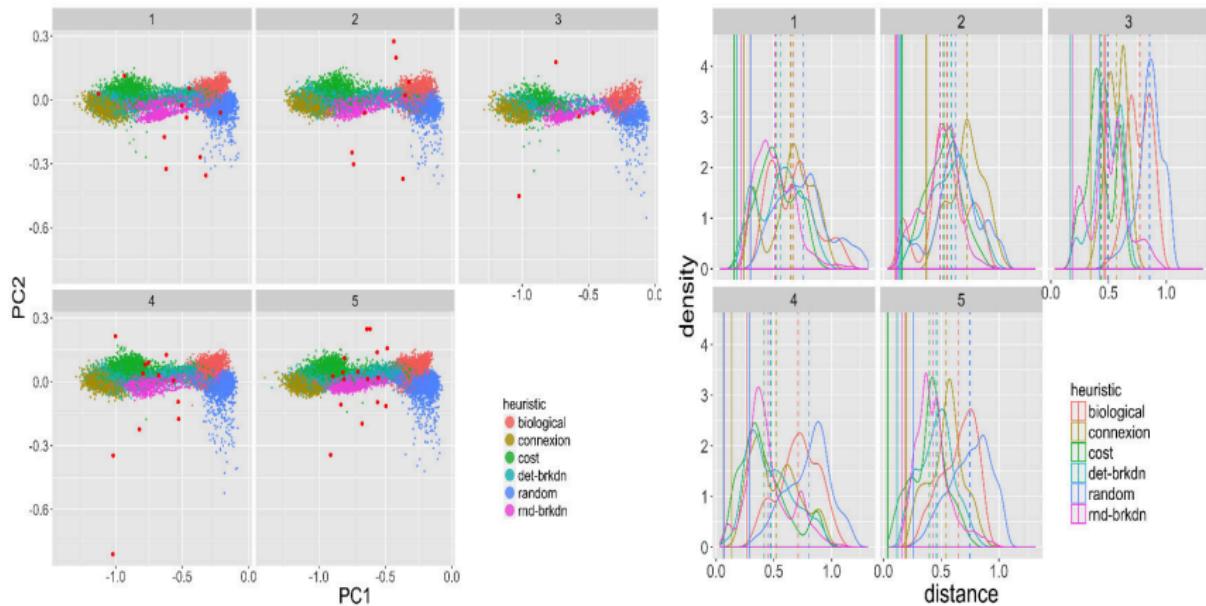
Formes de réseaux générées



Dans l'ordre: connexion; aléatoire; rupture de potentiel; rupture aléatoire; coûts-bénéfices; biologique.

Résultats : heuristiques de réseau

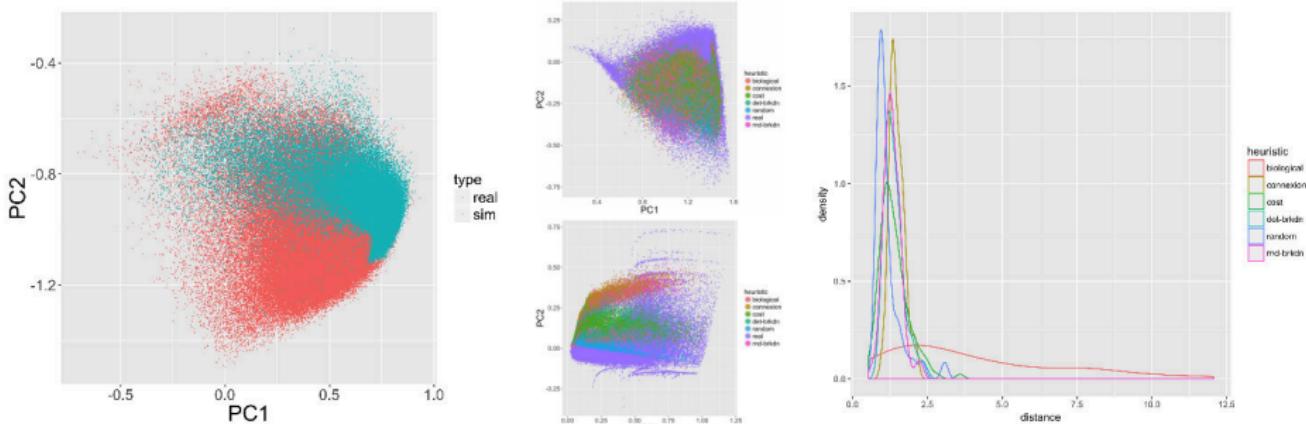
Comparaison des espaces faisables pour les indicateurs de réseau à densité de population fixée



(Gauche) Espaces faisables par classes morphologiques ; (Droite) Distribution des distances aux topologies des réseaux réels

Résultats : calibration

Calibration (modèle exploré avec OpenMole [Reuillon et al., 2013], $\sim 10^6$ exécutions) au premier ordre sur indicateurs morphologiques et topologiques, et sur les matrices de corrélation.

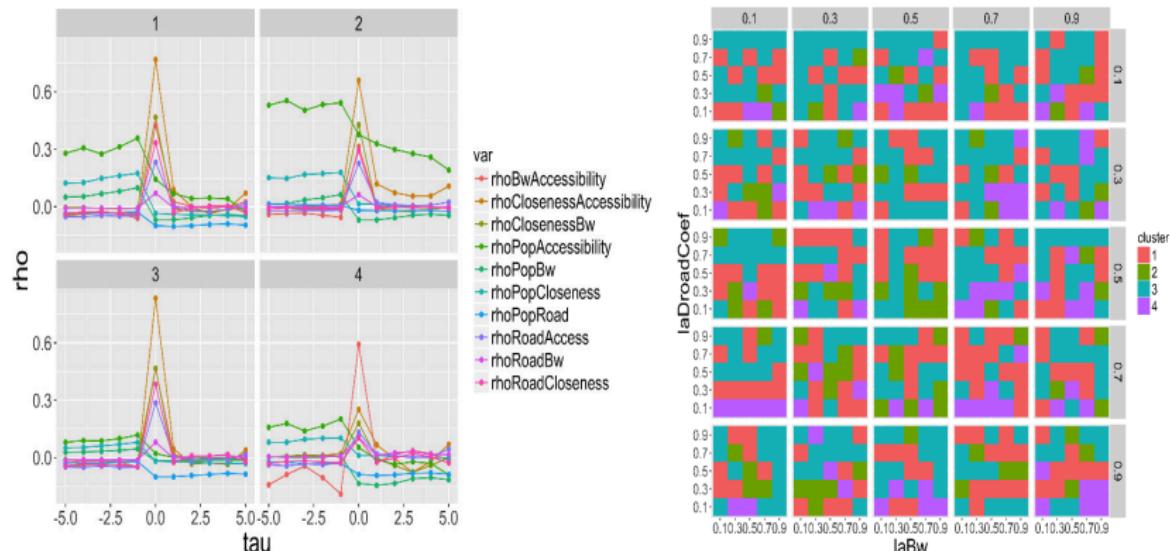


(Gauche) Espace des indicateurs complet; (Centre) Morphologique et topologique, pour chaque heuristique de réseau; (Droite) Distribution des distances cumulées pour les indicateurs et les corrélations.

Résultats : régimes de causalité

Apprentissage non-supervisé sur les corrélations retardées entre variables locales montre différents régimes de causalité

→ Lien entre le *régime de co-évolution* et les propriétés morphogénétiques du système urbain



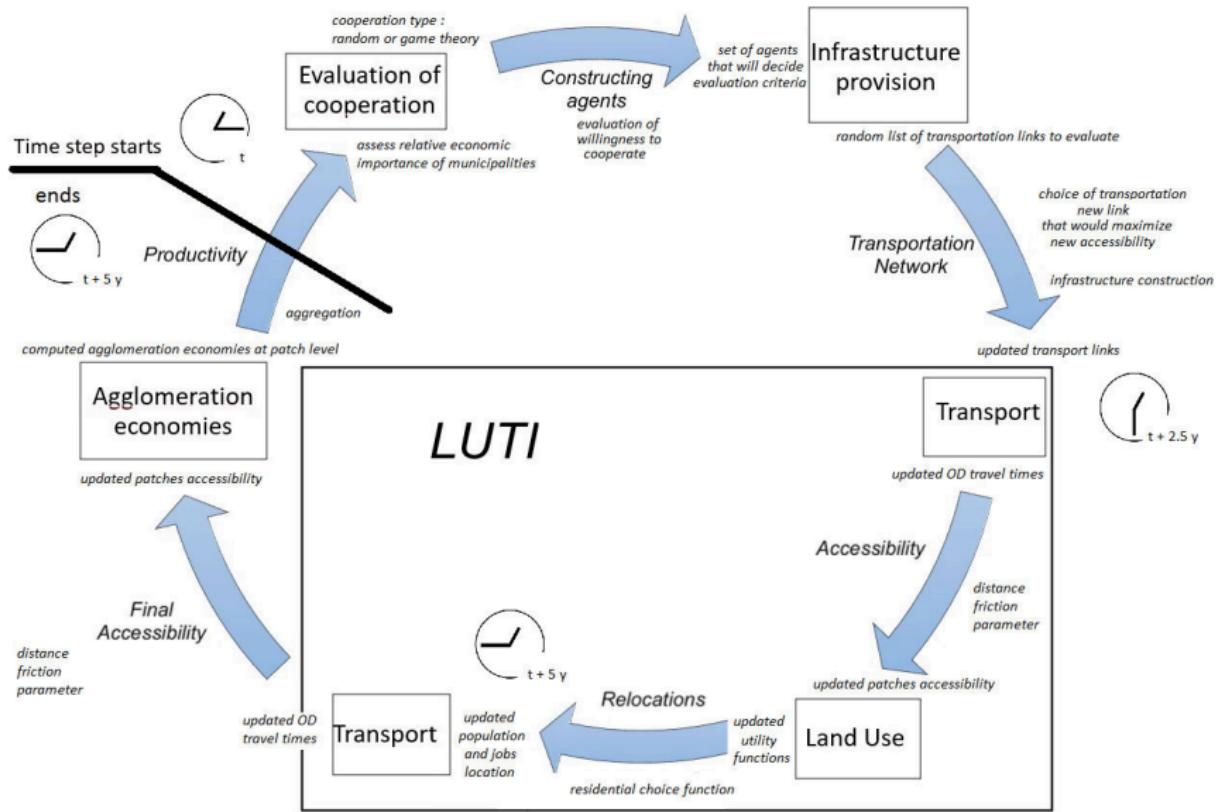
(Gauche) Profils de corrélation retardées des centres des clusters; (Droite) Distribution des régimes dans l'espace des paramètres

- ① Introduction
- ② Diversité des modèles et applications
- ③ Modèles de mobilité: prévision de la demande de transport
- ④ Modèles d'interaction transport-usage du sol
- ⑤ Modèles de dynamiques urbaines
- ⑥ Modèles de morphogenèse urbaine
 - Morphogenèse biologique
 - Co-évolution réseaux territoires
 - Gouvernance des transports
- ⑦ Epistémologie des modèles de simulation

Réalisme des règles de croissance de réseau dans les modèles de croissance urbaine ?

- une approche par la co-évolution incluant la gouvernance des transports [Raimbault and Le Néchet, 2021]
- modèle LUTI + provision d'infrastructure (LUTECIA)
- co-évolution transport/usage du sol
- application de théorie des jeux pour modéliser les décisions des acteurs locaux pour l'extension des infrastructures
- importance de l'accessibilité

Structure du modèle LUTECIA



Modélisation de la gouvernance

Matrices des utilités pour chaque acteur selon les choix

0 1	C	NC
C	$U_i = \kappa \cdot \Delta X_i(Z_C^*) - I - \frac{J}{2}$	$\begin{cases} U_0 = \kappa \cdot \Delta X_0(Z_0^*) - I \\ U_1 = \kappa \cdot \Delta X_1(Z_1^*) - I - \frac{J}{2} \end{cases}$
NC	$\begin{cases} U_0 = \kappa \cdot \Delta X_0(Z_0^*) - I - \frac{J}{2} \\ U_1 = \kappa \cdot \Delta X_1(Z_1^*) - I \end{cases}$	$U_i = \kappa \cdot \Delta X_i(Z_i^*) - I$

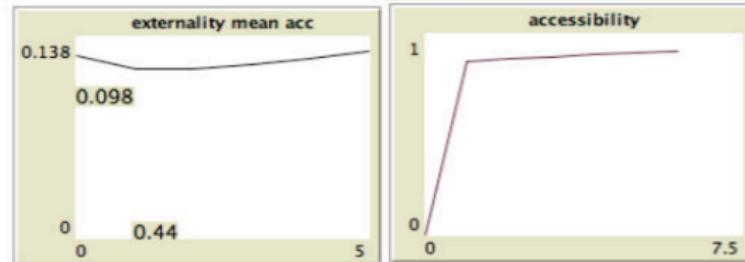
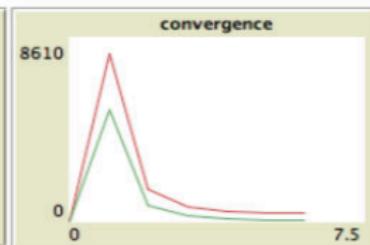
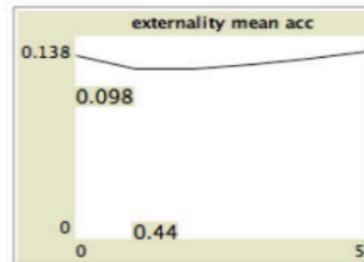
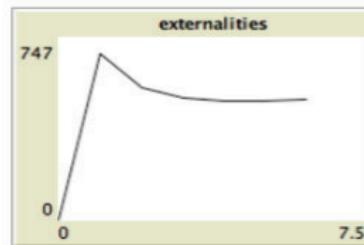
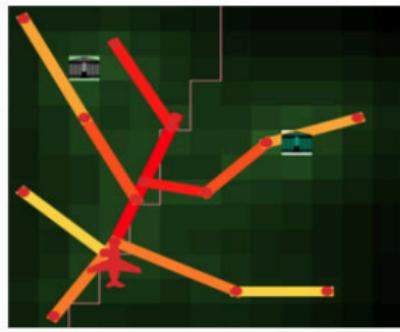
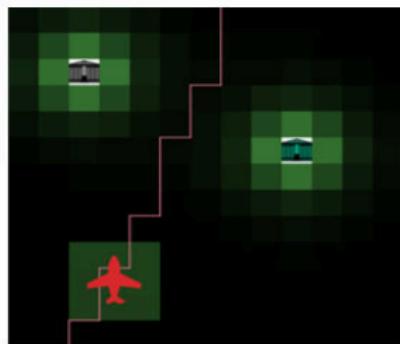
→ équilibre de Nash mixte pour des acteurs en compétition

Paramètres du modèle

Sub-model	Parameter	Name
Land-use	λ	Accessibility range
	γ_A	Cobb-Douglas exponents actives
	γ_E	Cobb-Douglas exponents employments
	β	Discrete choices exponent
	α	Relocation rate
Transport	v_G	Network speed
Governance	J	Collaboration cost
	I_r	Infrastructure length

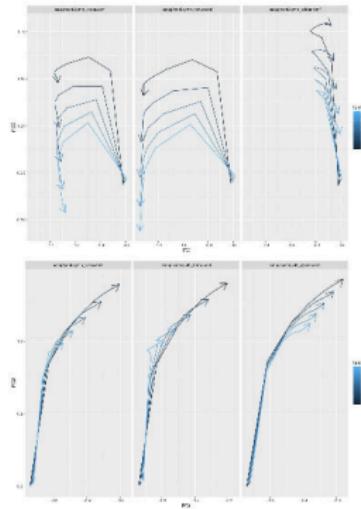
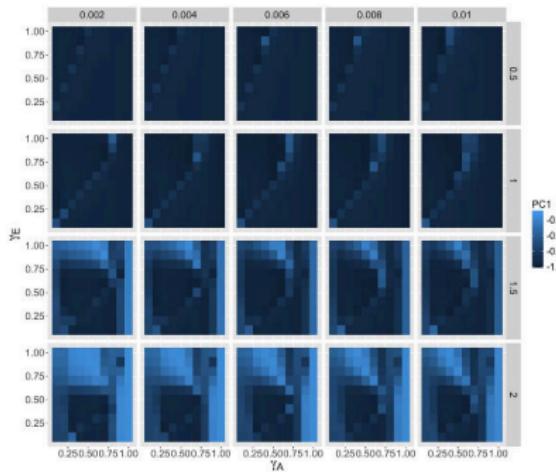
Exemples de sorties

Implémentation : NetLogo ; exploration par calcul intensif sur grille via OpenMole [Reuillon et al., 2013]



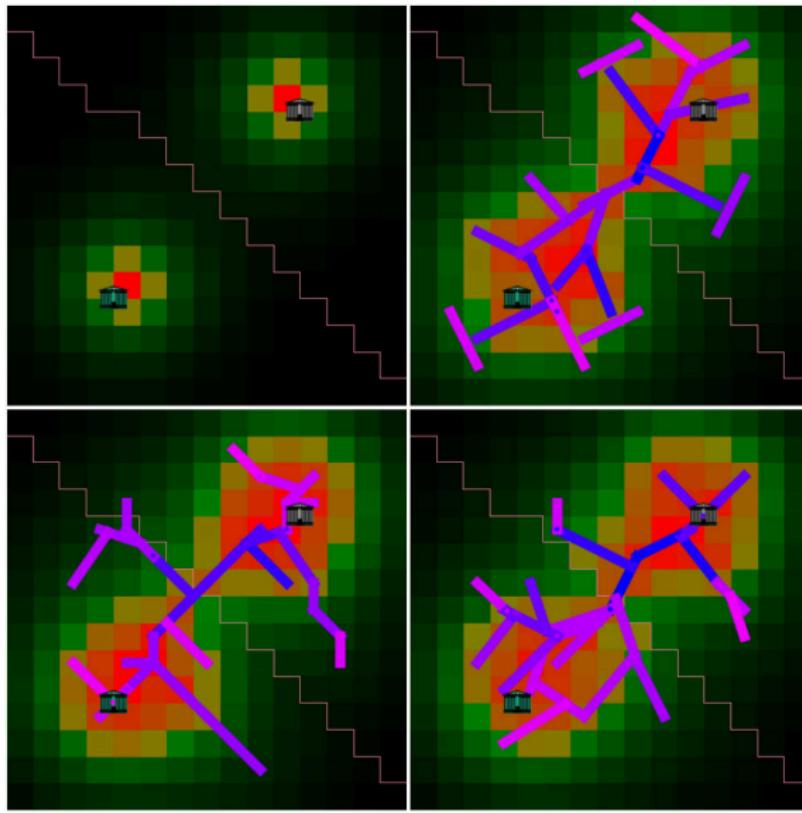
Dynamiques d'usage du sol

- Grande diversité de trajectoires morphologiques dans le temps en variant $\gamma_A, \gamma_E, \lambda, \beta$
- Diversité des formes finales obtenues
- Possibilité de minimiser, à $\alpha = 1$, la quantité totale de relocalisation



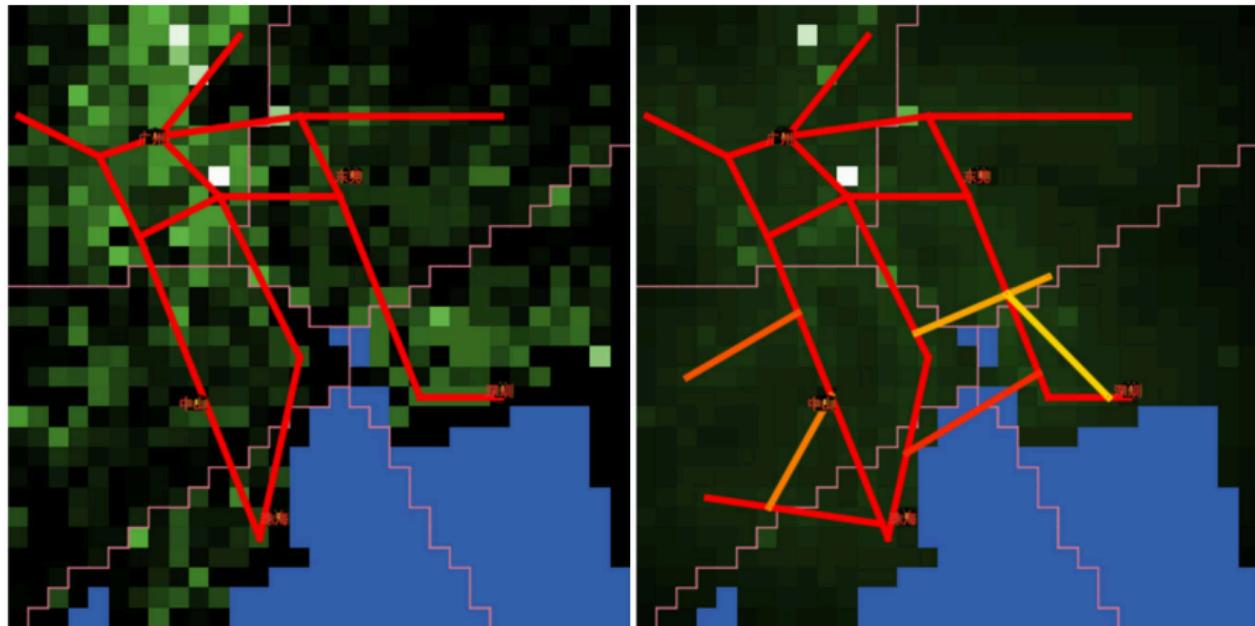
Exploration du modèle

Influence des paramètres de gouvernance sur la topologie du réseau



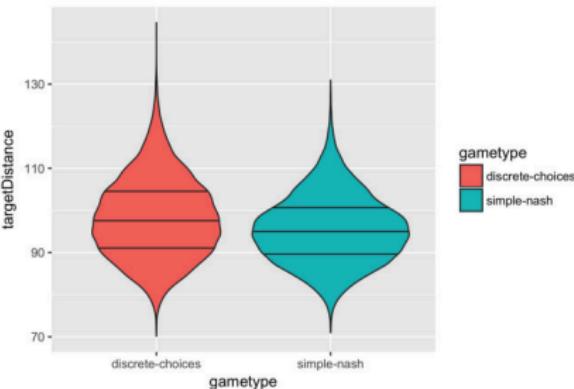
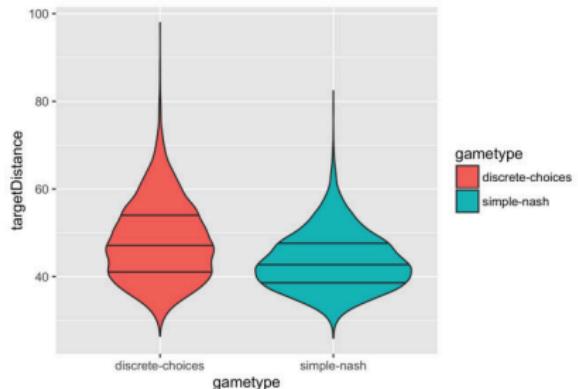
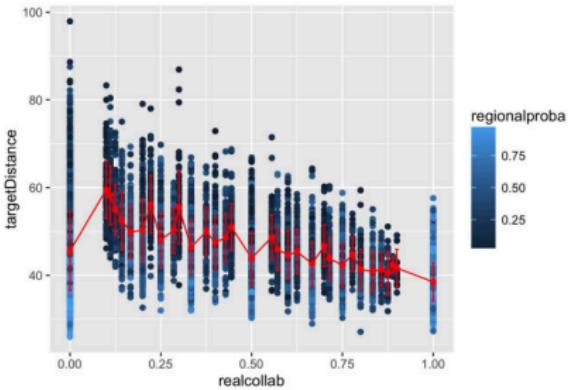
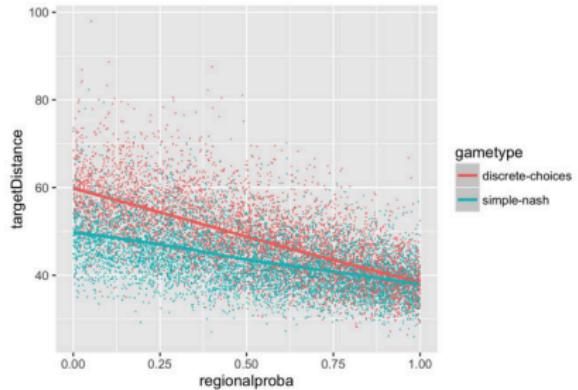
Application du modèle

Application stylisée à la méga-région urbaine du Delta de la Rivière des Perles



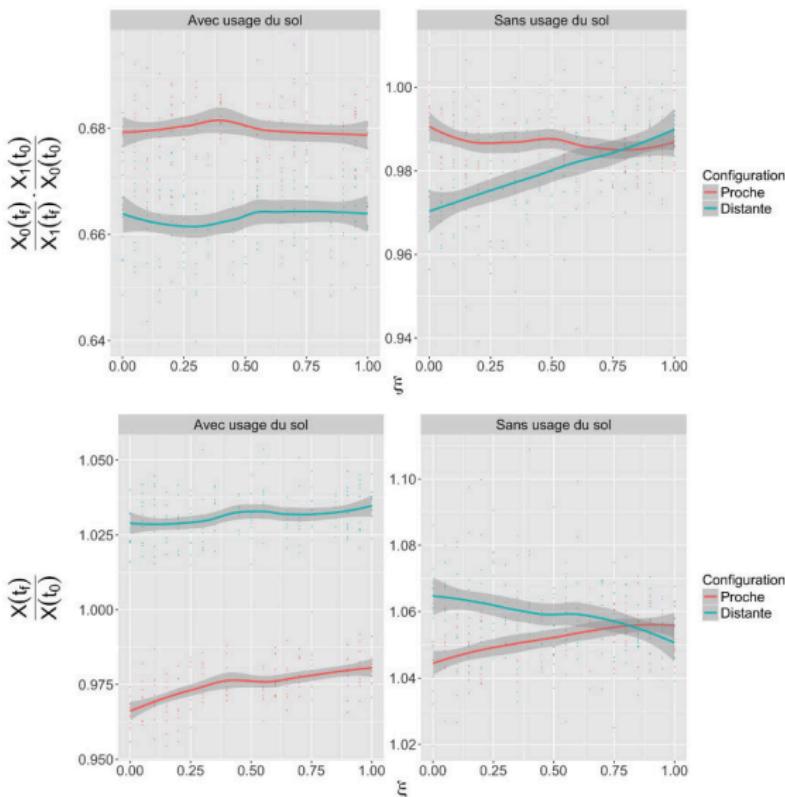
Calibration du modèle

Calibration sur le réseau générée, à usage du sol fixé



Effets de la co-évolution

Effets du couplage entre l'étalement urbain et la croissance du réseau de transport



Modèles de transport et modèles urbains

- 1 Introduction
- 2 Diversité des modèles et applications
- 3 Modèles de mobilité: prévision de la demande de transport
- 4 Modèles d'interaction transport-usage du sol
- 5 Modèles de dynamiques urbaines
- 6 Modèles de morphogenèse urbaine
 - Morphogenèse biologique
 - Co-évolution réseaux territoires
 - Gouvernance des transports
- 7 Epistémologie des modèles de simulation

Familles de fonctions des modèles [Varenne, 2018]:

- **Perception et observation:** moyen de perception, de visualisation, intermédiaire expérimental
- **Compréhension:** description, prédiction, explication, compréhension
- **Construction de théorie:** interprétation d'une théorie, test de sa cohérence interne, applicabilité, compatibilité avec d'autres théories
- **Communication:** communication scientifique, participation des acteurs
- **Prise de décision:** planification, gestion, prise de décision, prescription du système

- **Perception et observation:** quelle information est extraite
- **Description:** quelle quantité d'information est incluse
- **Prédiction:** pouvoir prédictif predictive (indicateurs quantitatifs ou comportement qualitatif)
- **Explication et compréhension:** quelle structure causale du système est capturée
- **Construction de théorie:** comment le modèle contribue à la théorie, au couplage de ses composants (par exemple intermédiaire d'interdisciplinarité)
- **Communication:** quelle information est transmise et à destination de quels agents
- **Prise de décision:** comment la décision est-elle appuyée, quels bénéfices et pour quelle dimension (social, environnemental, etc.) ?

Validation: modèles de simulation

Synthèse des méthodes de validation des modèles de simulation par [Sargent, 2010]

- ① validation indépendante et vérification (modélisateurs comme agents cognitifs [Giere, 2010])
- ② processus itératif entre modèles conceptuels et de simulation, et le système considéré
- ③ Techniques de validation: comparaison, conditions extrêmes, données historiques, validité interne, analyse de sensibilité, performance prédictive, test de Turing
- ④ Techniques spécifiques pour la validité opérationnelle
- ⑤ Documentation du processus de validation est essentielle
- ⑥ Certification par des agences officielles: la science comme un processus social

[Landry et al., 1983] similaire en recherche opérationnelle

[Reuillon et al., 2013] méthodes avancées d'analyse de sensibilité et validation, en partie pour la géographie, dans le logiciel libre OpenMOLE

Reproductibilité

[Stodden et al., 2013]

reviewable	replicable	confirmable	auditable	reproducible
Description available	Tools available (may be private)	Results independently obtainable	Data and software archive exists (may be private)	Data and software archive exists in public

Conclusion

À retenir sur la modélisation en géographie théorique et quantitative

- multiples méthodes et approches de modélisation complémentaires, importance de l'interdisciplinarité et des multiples points de vue
- modèles plus ou moins appliqués, validés, calibrés, opérationnels

À retenir sur les modèles urbains liés à la mobilité et aux transports

- diversité d'approches et de disciplines qui ont leur propres questions
- différents domaines d'applications et possibilités d'applications opérationnelles
- contexte socio-économique de construction et d'application des modèles n'est pas à détacher du cadre scientifique
- avoir un regard critique sur les modèles, comprendre leur avantages et leur limites

Pour aller plus loin sur la validation des modèles de simulation

- méthodes d'analyse de sensibilité et de validation
- embarquement de modèle dans la plateforme ouverte OpenMOLE implémentant ces méthodes <https://openmole.org>

References I

-  Baffi, S. (2016).
Le chemin de fer et la ville dans le processus de territorialisation en Afrique du Sud: de la séparation à l'intégration territoriale?
PhD thesis, Paris 1.
-  Balmer, M., Rieser, M., Meister, K., Charypar, D., Lefebvre, N., and Nagel, K. (2009).
MatSim-t: Architecture and simulation times.
In *Multi-agent systems for traffic and transportation engineering*, pages 57–78. IGI Global.
-  Banos, A. and Charpentier, A. (2007).
Simulating pedestrian behavior in subway stations with agents.
In *Proceedings of the Fourth Conference of the European Social Simulation Association (ESSA2007)*, pages 611–621. Citeseer.

References II

-  Batty, M. (1991).
Generating urban forms from diffusive growth.
Environment and Planning A, 23(4):511–544.
-  Batty, M. and Milton, R. (2021).
A new framework for very large-scale urban modelling.
Urban Studies, 58(15):3071–3094.
-  Benenson, I., Martens, K., and Birfir, S. (2008).
Parkagent: An agent-based model of parking in the city.
Computers, Environment and Urban Systems, 32(6):431–439.
-  Caruso, G., Vuidel, G., Cavailhès, J., Frankhauser, P., Peeters, D., and Thomas, I. (2011).
Morphological similarities between dbm and a microeconomic model of sprawl.
Journal of geographical systems, 13(1):31–48.

References III

 Chérel, G., Cottineau, C., and Reuillon, R. (2015).

Beyond corroboration: Strengthening model validation by looking for unexpected patterns.

PloS one, 10(9):e0138212.

 Commenges, H. (2013).

L'invention de la mobilité quotidienne. Aspects performatifs des instruments de la socio-économie des transports.

PhD thesis, Université Paris-Diderot-Paris VII.

 Cottineau, C. (2014).

L'évolution des villes dans l'espace post-soviétique. Observation et modélisations.

PhD thesis, Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne.

References IV

-  Cottineau, C., Reuillon, R., Chapron, P., Rey-Coyrehourcq, S., and Pumain, D. (2015).
A modular modelling framework for hypotheses testing in the simulation of urbanisation.
Systems, 3(4):348–377.
-  Dodds, P. S., Dewhurst, D. R., Hazlehurst, F. F., Van Oort, C. M., Mitchell, L., Reagan, A. J., Williams, J. R., and Danforth, C. M. (2017).
Simon's fundamental rich-get-richer model entails a dominant first-mover advantage.
Physical Review E, 95(5):052301.
-  Dupuy, G. (1987).
Vers une théorie territoriale des réseaux: une application au transport urbain.
In *Annales de géographie*, pages 658–679. JSTOR.

References V

-  Florczyk, A., Corbane, C., Ehrlich, D., Freire, S., Kemper, T., Maffenini, L., Melchiorri, M., Pesaresi, M., Politis, P., Schiavina, M., et al. (2019).
Ghsl data package 2019.
Luxembourg. EUR, 29788.
-  Fujita, M. and Thisse, J.-F. (1996).
Economics of agglomeration.
Journal of the Japanese and international economies, 10(4):339–378.
-  Giere, R. N. (2010).
Explaining science: A cognitive approach.
University of Chicago Press.
-  Landry, M., Malouin, J.-L., and Oral, M. (1983).
Model validation in operations research.
European journal of operational research, 14(3):207–220.

References VI



Le Néchet, F. (2010).

Approche multiscalaire des liens entre mobilité quotidienne, morphologie et soutenabilité des métropoles européennes: cas de Paris et de la région Rhin-Ruhr.

PhD thesis, Université Paris-Est.



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.



Pumain, D. (1997).

Pour une théorie évolutive des villes.

L'Espace géographique, pages 119–134.

References VII



Pumain, D. (2008).

The socio-spatial dynamics of systems of cities and innovation processes: a multi-level model.

The Dynamics of Complex Urban Systems, pages 373–389.



Pumain, D. (2010).

Une théorie géographique des villes.

Bulletin de la Société géographie de Liège, 55(2):5–15.



Pumain, D. (2018).

An evolutionary theory of urban systems.

In *International and transnational perspectives on urban systems*, pages 3–18. Springer.



Rimbault, J. (2017).

An applied knowledge framework to study complex systems.

In *Complex Systems Design & Management*, pages 31–45.

References VIII



Rimbault, J. (2018a).

Calibration of a density-based model of urban morphogenesis.
PloS one, 13(9):e0203516.



Rimbault, J. (2018b).

Caractérisation et modélisation de la co-évolution des réseaux de transport et des territoires.

PhD thesis, Université Paris 7 Denis Diderot.



Rimbault, J. (2018c).

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

In *BioMim Expo 2018*.



Rimbault, J. (2018d).

Multi-modeling the morphogenesis of transportation networks.

In *Artificial Life Conference Proceedings*, pages 382–383. MIT Press.

References IX



Rimbault, J. (2019a).

Evolving accessibility landscapes: mutations of transportation networks in China.

In Aveline-Dubach, N., editor, *PATHWAYS OF SUSTAINABLE URBAN DEVELOPMENT ACROSS CHINA: THE CASES OF HANGZHOU, DATONG AND ZHUHAI*, pages 89–108. Imago Editor.

ebook.



Rimbault, J. (2019b).

An urban morphogenesis model capturing interactions between networks and territories.

In *The mathematics of urban morphology*, pages 383–409. Springer.



Rimbault, J. (2020).

Indirect evidence of network effects in a system of cities.

Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science, 47(1):138–155.

-  Raimbault, J. (2021).
Modeling the co-evolution of cities and networks.
In *Handbook of Cities and Networks*. Edward Elgar Publishing.
-  Raimbault, J., Banos, A., and 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)*, pages 51–60.
-  Raimbault, J. and Batty, M. (2021).
Estimating public transport congestion in uk urban areas with open transport models.
GIS Research UK (GISRUK).

-  Rimbault, J., Denis, E., and Pumain, D. (2020a). Empowering urban governance through urban science: Multi-scale dynamics of urban systems worldwide. *Sustainability*, 12(15):5954.
-  Rimbault, J. and Le Néchet, F. (2021). Introducing endogenous transport provision in a luti model to explore polycentric governance systems. *Journal of Transport Geography*, 94:103115.
-  Rimbault, J., Perret, J., and Reuillon, R. (2020b). A scala library for spatial sensitivity analysis. *GISRUK*.
-  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.

References XII

-  Reuillon, R., Schmitt, C., de Aldama, R., and Mouret, J.-B. (2015). A new method to evaluate simulation models: the calibration profile (cp) algorithm a new method to evaluate simulation models: The calibration profile (cp) algorithm.
Journal of Artificial Societies and Social Simulation, 18(1):<http://jasss.soc.soton.ac.uk/18/1/1.html>.
-  Sargent, R. G. (2010). Verification and validation of simulation models. In *Proceedings of the 2010 winter simulation conference*, pages 166–183. IEEE.
-  Schmitt, C. (2014). *Modélisation de la dynamique des systèmes de peuplement: de SimpopLocal à SimpopNet*. PhD thesis, Université Panthéon-Sorbonne-Paris I.

References XIII

-  Schmitt, C., Rey-Coyrehourcq, S., Reuillon, R., and Pumain, D. (2015).
Half a billion simulations: Evolutionary algorithms and distributed computing for calibrating the simpoplocal geographical model.
Environment and Planning B: Planning and Design, 42(2):300–315.
-  Spooner, F., Abrams, J. F., Morrissey, K., Shaddick, G., Batty, M., Milton, R., Dennett, A., Lomax, N., Malleson, N., Nelissen, N., et al. (2021).
A dynamic microsimulation model for epidemics.
Social Science & Medicine, 291:114461.
-  Stodden, V., Borwein, J., and Bailey, D. H. (2013).
Setting the default to reproducible.
computational science research. SIAM News, 46(5):4–6.

References XIV

-  Swerts, E. (2017).
A data base on chinese urbanization: Chinacities.
Cybergeo: European Journal of Geography.
-  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.
-  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.
-  Turing, A. M. (1990).
The chemical basis of morphogenesis.
Bulletin of mathematical biology, 52(1):153–197.

References XV

-  van Vliet, J., Hurkens, J., White, R., and van Delden, H. (2012). An activity-based cellular automaton model to simulate land-use dynamics.
Environment and Planning-Part B, 39(2):198.
-  Varenne, F. (2018).
Théories et modèles en sciences humaines: le cas de la géographie. Éditions Matériologiques.
-  Viguié, V., Hallegatte, S., and Rozenberg, J. (2014). Downscaling long term socio-economic scenarios at city scale: A case study on paris.
Technological forecasting and social change, 87:305–324.
-  W Axhausen, K., Horni, A., and Nagel, K. (2016).
The multi-agent transport simulation MATSim. Ubiquity Press.



Wegener, M. (2004).

Overview of land use transport models.

In *Handbook of transport geography and spatial systems*. Emerald Group Publishing Limited.