

# Exploration et validation des modèles de simulation avec la plateforme ouverte OpenMOLE

J. Raimbault<sup>1,2,3,4,\*</sup>

\* [juste.raimbault@ign.fr](mailto:juste.raimbault@ign.fr)

<sup>1</sup> LASTIG, IGN-ENSG

<sup>2</sup>CASA, UCL

<sup>3</sup>UPS CNRS 3611 ISC-PIF

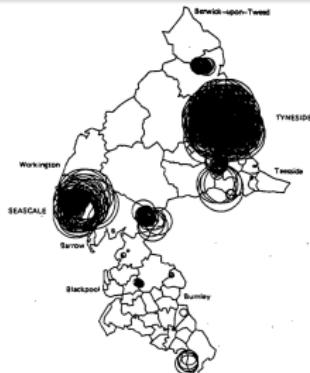
<sup>4</sup>UMR CNRS 8504 Géographie-cités

Journée d'étude Big Data et données spatialisées

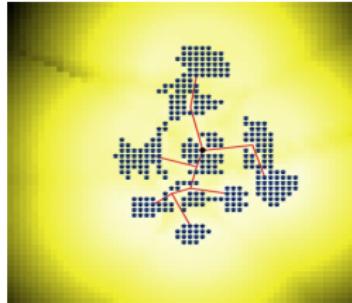
IGN

29 Juin 2023

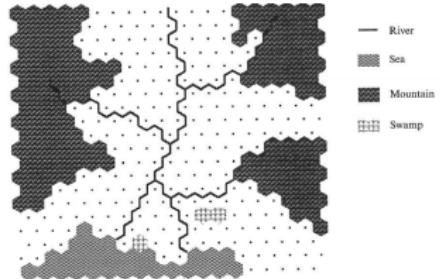
# Modélisation et simulation en géographie



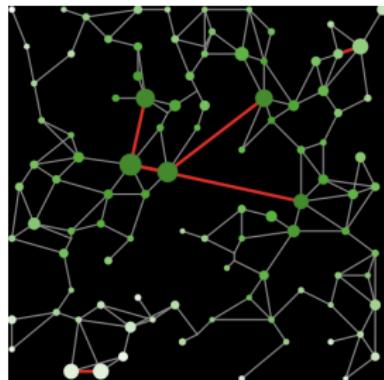
Machine d'analyse géographique  
[Openshaw et al., 1987]



Morphogenèse urbaine hybride  
[Raimbault et al., 2014]



Modèle Simpop 1 [Sanders et al., 1997]



Modèle SimpopNet [Schmitt, 2014]

*Nécessité des modèles de simulation en géographie induite par les multiples complexités de ces systèmes ?*

- Complexité ontologique [Pumain, 2003]
- Complexité dynamique: non-ergodicité et dépendance au chemin [Pumain, 2012]
- Complexité et co-évolution [Raimbault, 2021a]
- Complexité et emergence [Raimbault, 2020]

Succession historique d'épistémologies dans le cas des systèmes de villes  
[Varenne, 2017]:

- ① Déduction depuis la théorie (top-down): Christaller
- ② Induction depuis l'empirique (bottom-up): Berry
- ③ Vers une épistémologie abductive (interaction itérative théorique-empirique): Pumain

→ la simulation permet la synthèse

# Validation des modèles de simulation

Multiples approches de la “validation” et “verification” des modèles [Rey-Coyrehourcq, 2015]: origine dans l’ingénierie système; statut épistémologique lié aux fonctions du modèle; approches empiriques ad-hoc.

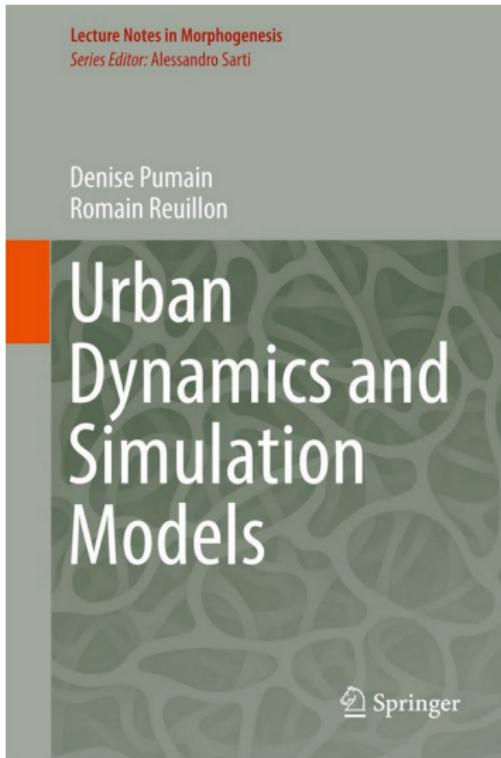
## *Constat d'un manque d'outils*

En pratique: tests unitaires du programme, validation interne, sorties visuelles, reproduction de motifs (quantitatif ou qualitatif), pouvoir prédictif, analyses de sensibilité.

→ en pratique, peu de latitude sur les hypothèses théoriques et de modélisation; peu d’interaction entre les domaines de connaissance.

[Rey-Coyrehourcq, 2015]: vers une validation par l’évaluation (faits stylisés, pattern-oriented modeling, multi-modélisation) en interaction avec la théorie et l’empirique.

# Nouvelles méthodes pour la simulation en sciences sociales : ERC Geodivercity



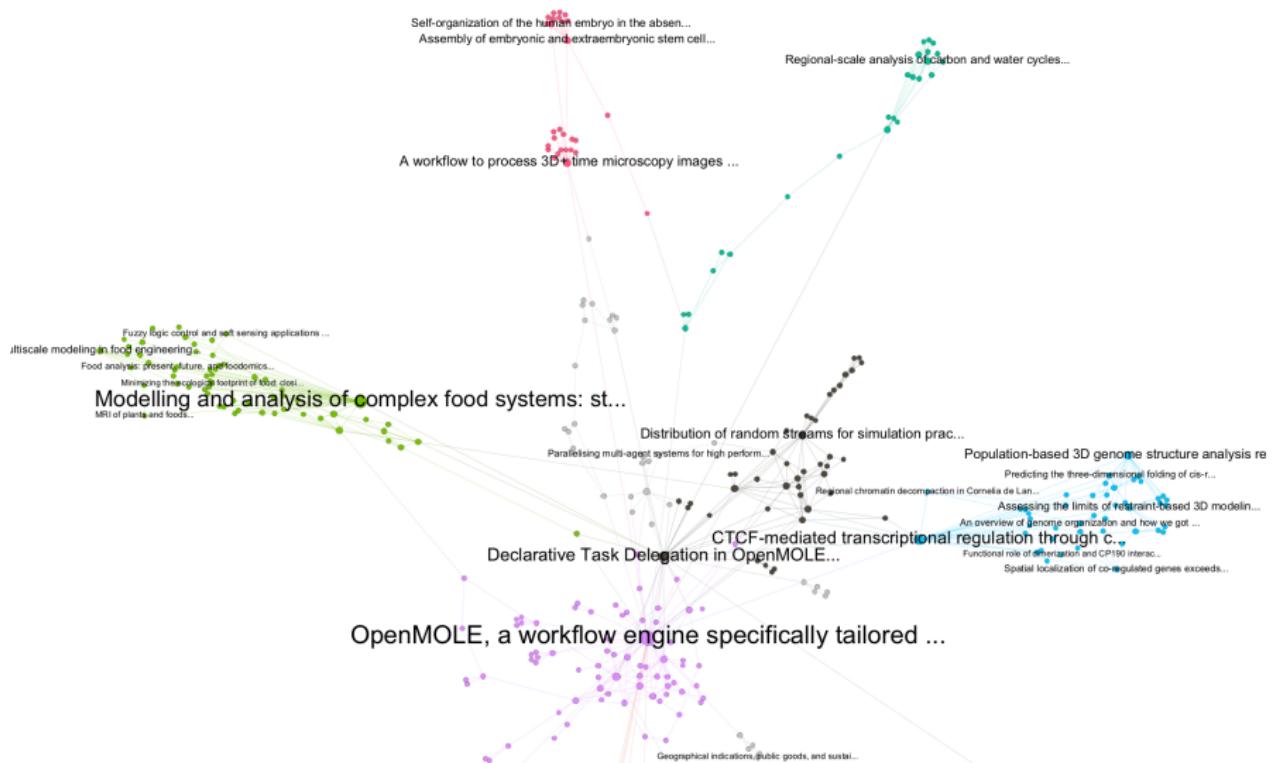
Développement de la théorie évolutive des villes [Pumain, 2018]

- Faits stylisés saillants pour l'ensemble des systèmes de villes principaux
- Construction de modèles de simulation (modèles à visée explicative)
- Outils et méthodes d'exploration des modèles de simulation : OpenMOLE développée principalement par R. Reuillon et M. Leclaire depuis 2008 à l'ISC-PIF



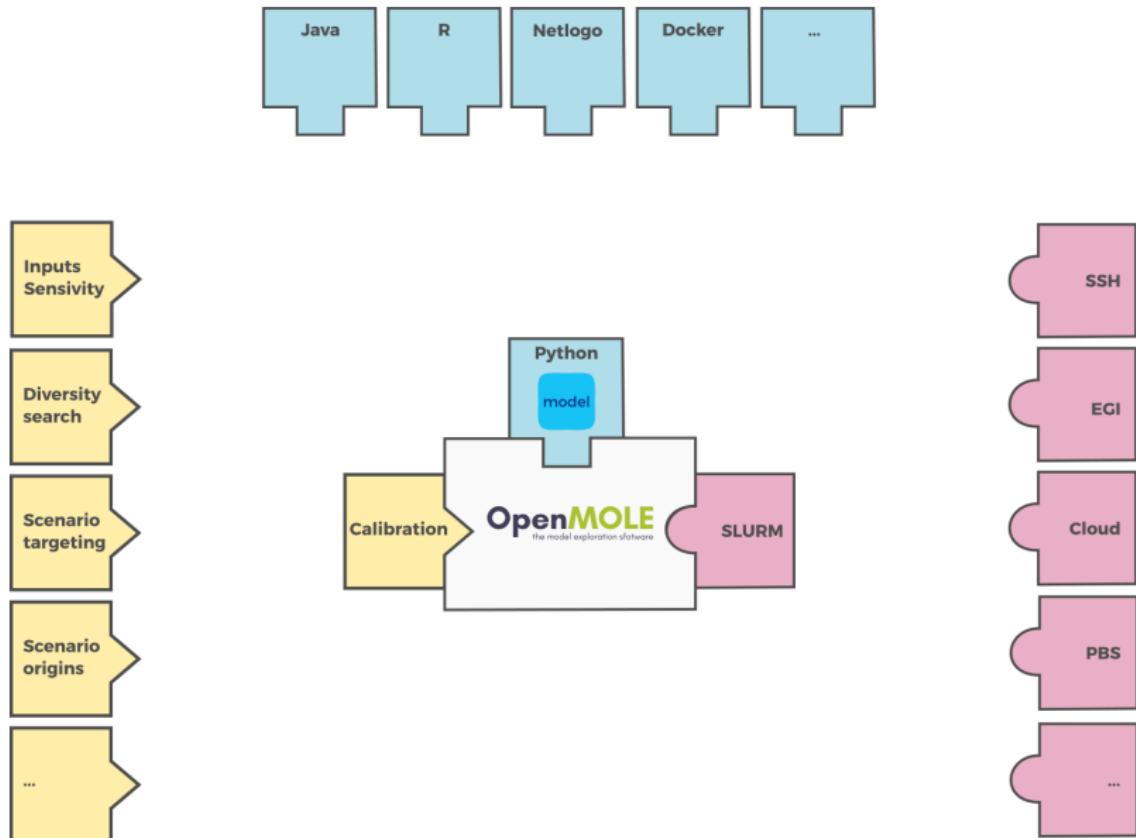
**OpenMOLE**

# Environnement scientifique d'OpenMOLE [Raimbault, 2018]



# Principes d'OpenMOLE

(i) Méthodes d'exploration et de validation innovantes; (ii) Passage à l'échelle par calcul distribué; (iii) Embarquement des modèles sans interférence.



# Une interface web ergonomique

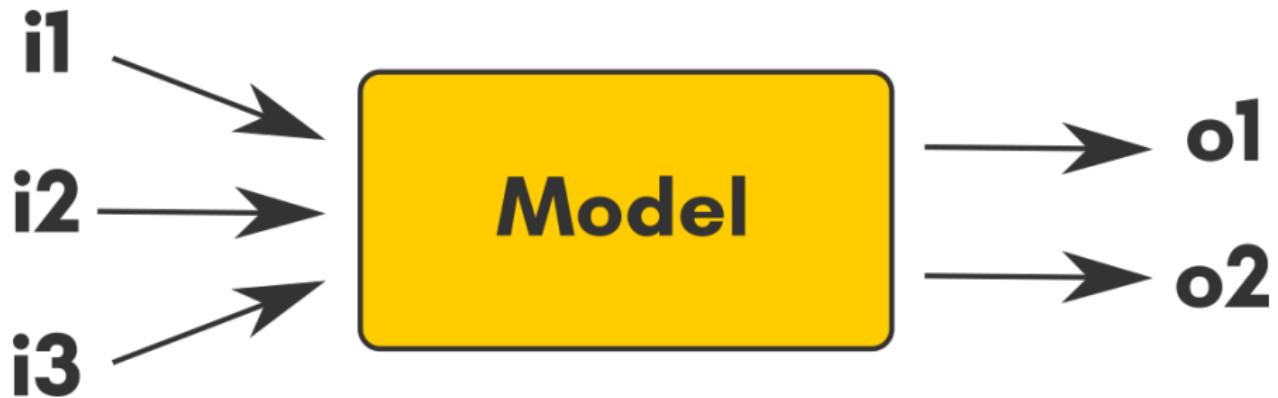
The screenshot shows the OpenMOLE web interface. On the left, there is a sidebar with a list of project examples:

- 00\_Hello World in Python
- 01\_Hello World in R
- 02\_Hello World in Scilab
- 03\_Hello World in Java
- 04\_Hello World in NetLogo
- 05\_Hello World in Julia
- 06\_Hello World in GAMA
- 07\_Hello World in a Container
- 08\_Hello with OpenMOLE plugin
- 09\_Model Exploration Tutorial
- 10\_Native Application Tutorial
- 11\_Workflow Tutorial
- 12\_Morris Sensitivity Analysis
- 13\_Saltelli Sensitivity Analysis
- 14\_ABC
- 15\_Calibration of Ants
- 16\_Optimise Ackley function in Python
- 17\_Pi Computation
- 18\_Random Forest
- 19\_SimpopLocal
- 20\_Metamimetic Networks
- 21\_Segmentation with FSL
- 22\_NSGA2 Test Functions
- 23\_Generate Visualisation

The main area contains a code editor window titled "Container.oms". The code is as follows:

```
1 val i = Val[Int]
2 val result = Val[String]
3 val resultInt = Val[Int]
4
5 val container = ContainerTask(
6   "debain:stable-slim",
7   "echo ${${i}+1}",
8   install = Seq("apt update", "apt install -y bash"),
9   stdOut = result
10 ) set (
11   inputs += i
12   inputs += result
13 )
14
15 val parse =
16   ScalaTask("""val resultInt = result.split("\n").last.toInt""") set (
17   inputs += result,
18   outputs += resultInt
19   )
20
21 DirectSampling{
22   sampling = i in (0 to 10),
23   evaluation = container --> parse
24 } hook (workDirectory / "result.csv")
25
```

# Modèles de simulation



# Agnostique aux langages

C  
R  
C++  
Java  
Scala  
Scilab  
Octave  
Python  
Netlogo  
...



# Modèle NetLogo

```
val model =  
  NetLogo6Task(  
    workDirectory / "Fire.nlogo",  
    List("setup", "while [any? turtles] [go]")) set (  
      inputs += seed,  
      outputs += (seed, density),  
      inputs += density mapped "density",  
      outputs += burned mapped "burned-trees"  
    )
```

DSL pour les scripts basé sur scala

# Modèle R

```
val i = Val[Int]

val rTask =
  RTask("""
    source("function.R")
    function(i)""") set (
      resources += workDirectory / "function.R",
      inputs += i
    )
```

Syntaxe similaire pour la PythonTask

# Container docker

```
val i = Val[Int]
val result = Val[String]
val resultInt = Val[Int]

val container =
  ContainerTask("debian:stable-slim", "echo $(( ${i}*2 ))",
    install = Seq("apt update", "apt install -y bash"),
    stdOut = result
  ) set (
    inputs += i
  )

val parse =
  ScalaTask("""val resultInt = result.split("\n").last.toInt""") set (
    inputs += result,
    outputs += resultInt
  )

DirectSampling(
  sampling = i in (0 to 10),
  evaluation = container -- parse
) hook (workDirectory / "result.csv")
```

# Méthodes

- Estimation de paramètres
- Analyse de sensibilité
- Étude de robustesse
- Optimisation

*Conçues pour passer à l'échelle, prendre en compte la stochasticité, être utilisable sur n'importe quel modèle et environnement de calcul.*

# Méthodes

```
DirectSampling(  
    evaluation = myModel,  
    sampling =  
        LHS(  
            500,  
            diffusion in (10.0, 100.0),  
            evaporation in (10.0, 100.0)  
        )  
)
```

Exemple de syntaxe d'une méthode : échantillonnage explicite

# Environnements de calcul: passage à l'échelle

*Prototypes locaux, passage à l'échelle transparent: zero déploiement, pas de connaissance technique requise, pas d'installation préalable.*

```
val cluster = SLURMEnvironment("login", "cluster.domain.org")

DirectSampling(
    evaluation = myModel on cluster,
    sampling =
        LHS(
            500,
            diffusion in (10.0, 100.0),
            evaporation in (10.0, 100.0)
        )
)
```

# Environnements supportés

*Environnements de calcul disponibles :*

- Multi-thread
- Delegation through SSH
- PBS
- SLURM
- Condor
- SGE
- OAR
- EGI Grid

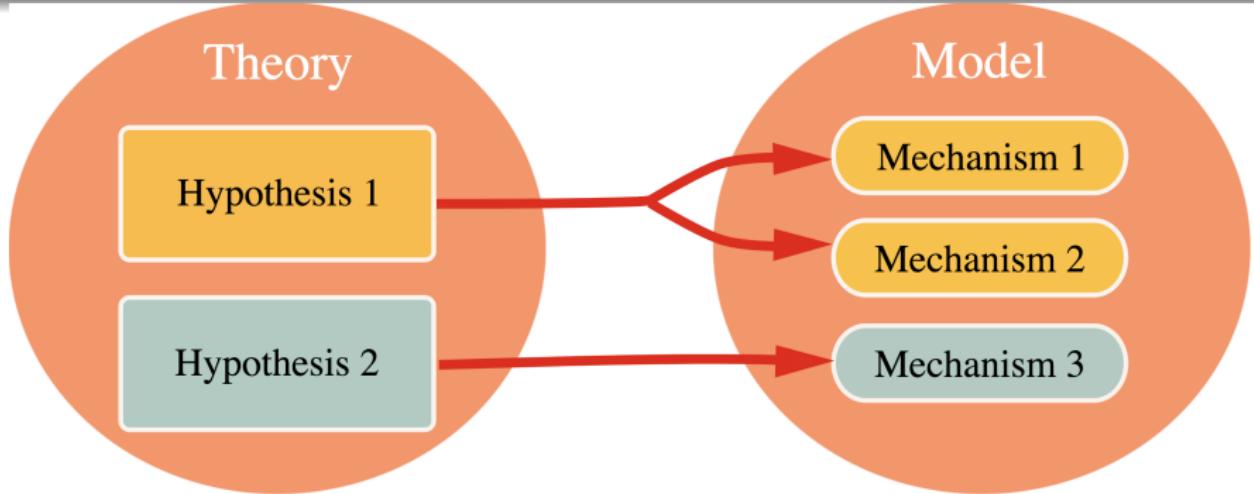
# Rôle des méthodes dans le processus de modélisation

*Cadre théorique et méthodes (algorithmes) pour accompagner le processus de modélisation*

Un processus de modélisation:

- ① Traçable: comprendre les choix effectués
- ② Reproductible: vérification des raisons de ceux-ci
- ③ Réutilisable: étudier des choix alternatifs

# Evaluation des modèles et théories



*Construire et évaluer une théorie impliquant des effets causaux par sa capacité à (re-)produire des motifs ou données.*

**Evaluation:** Comment s'assurer de

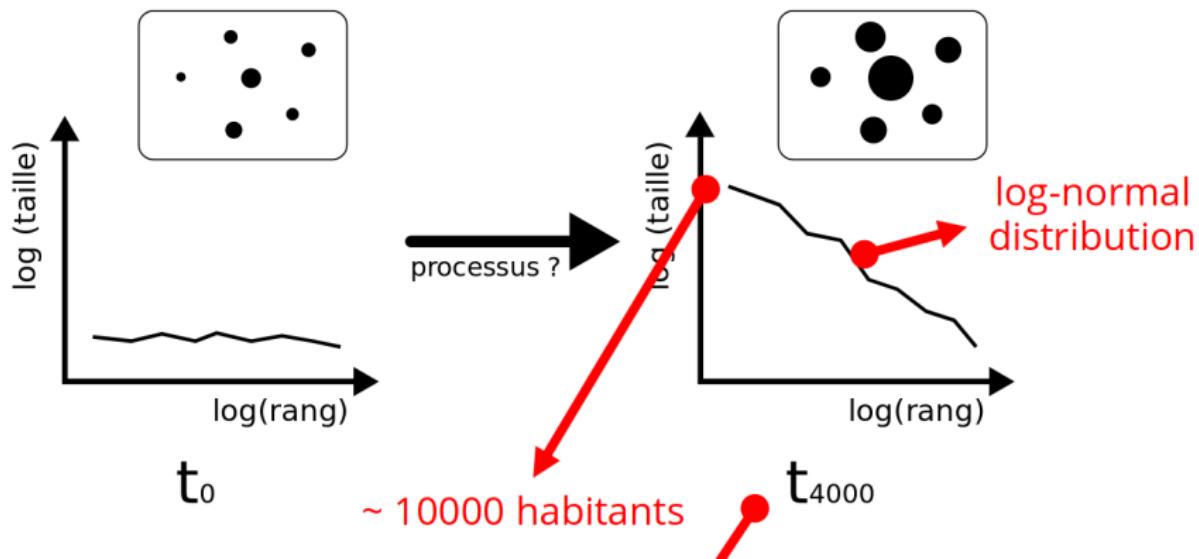
- ① La suffisance des mécanismes ?
- ② La nécessité des mécanismes ?
- ③ L'unicité des mécanismes ?

# Suffisance [Schmitt et al., 2015]

Approche classique: échantillonnage (ex. Sobol) → énorme quantité de données produites; le problème devient une question de fouille de données; espace des paramètres laissé majoritairement inexploré.

*Approche inverse: des sorties aux paramètres*

*Formalisation thématique d'indicateurs:*

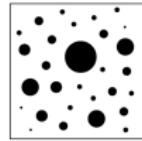
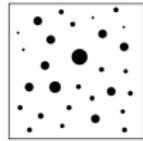
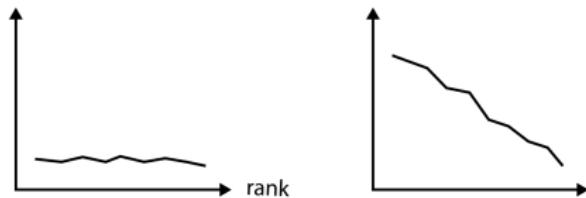


# Résultats de calibration

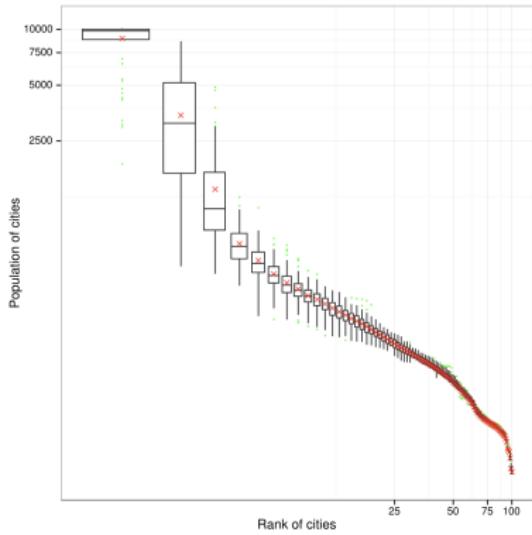
*Pas de compromis entre les trois objectifs.*

Searched pattern

log population



Produced pattern

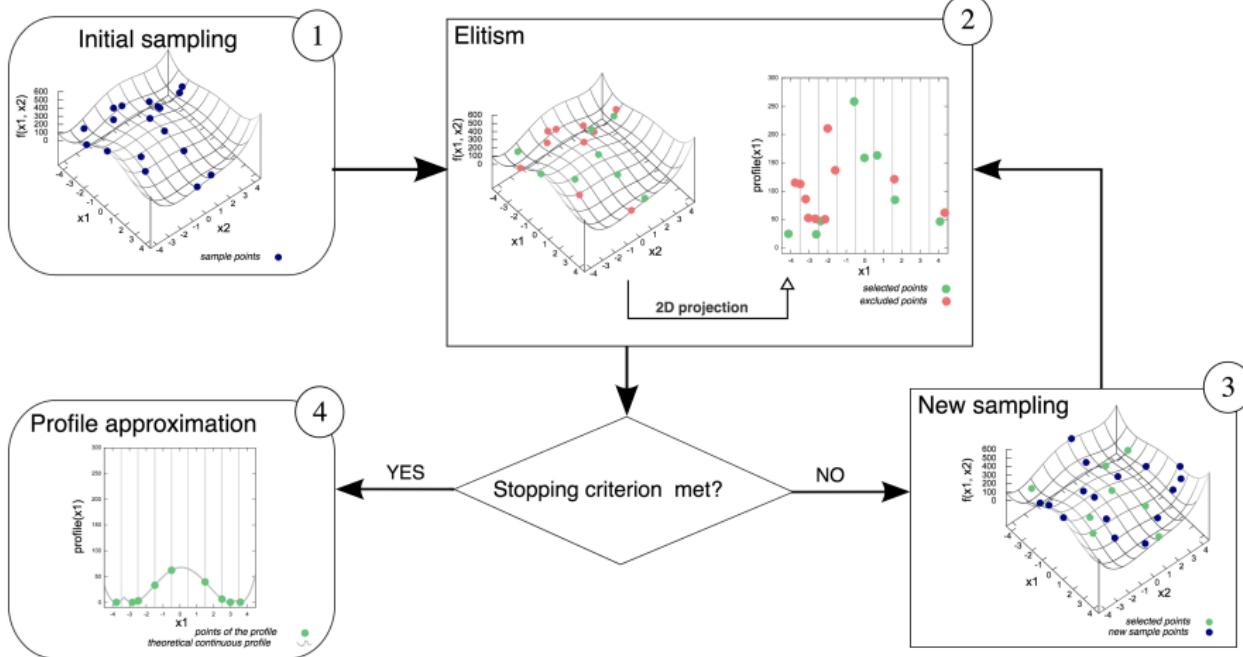


Performances: gestion de la stochasticité (gain x100), calcul distribué (gain x1000)

## Nouvel algorithme

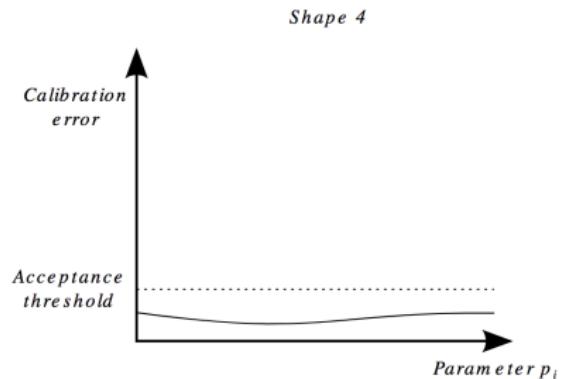
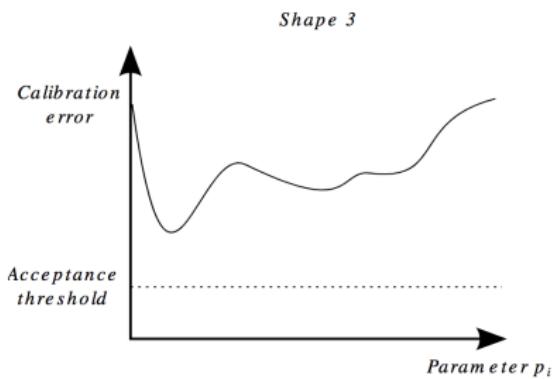
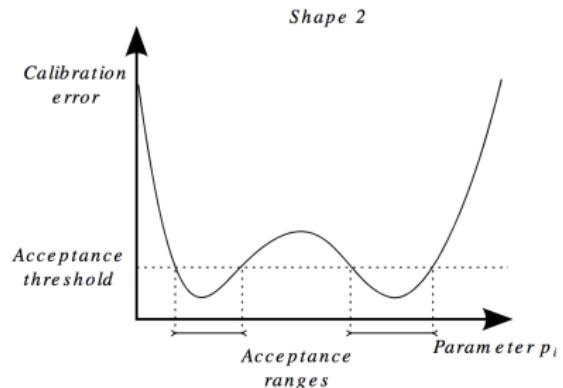
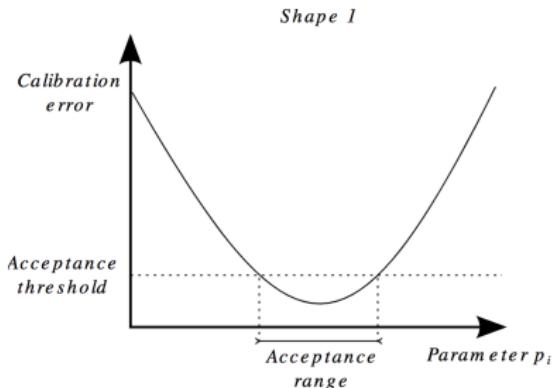
- ① Déetecte si un paramètre est nécessaire
- ② Contraint mieux les bornes des paramètres
- ③ Façon indirecte d'identifier des extensions possibles

# Algorithme des profils

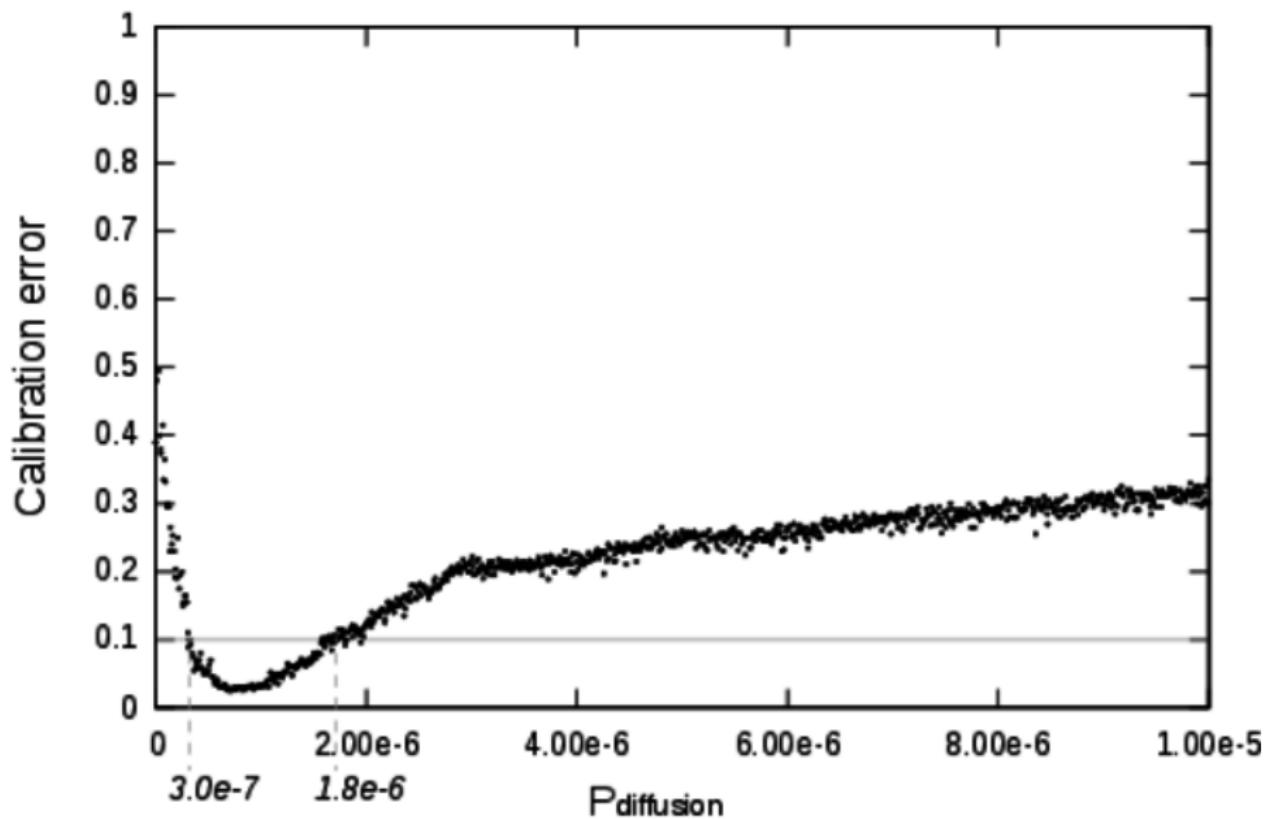


*Meilleure calibration pour des pas fixés le long d'une dimension*

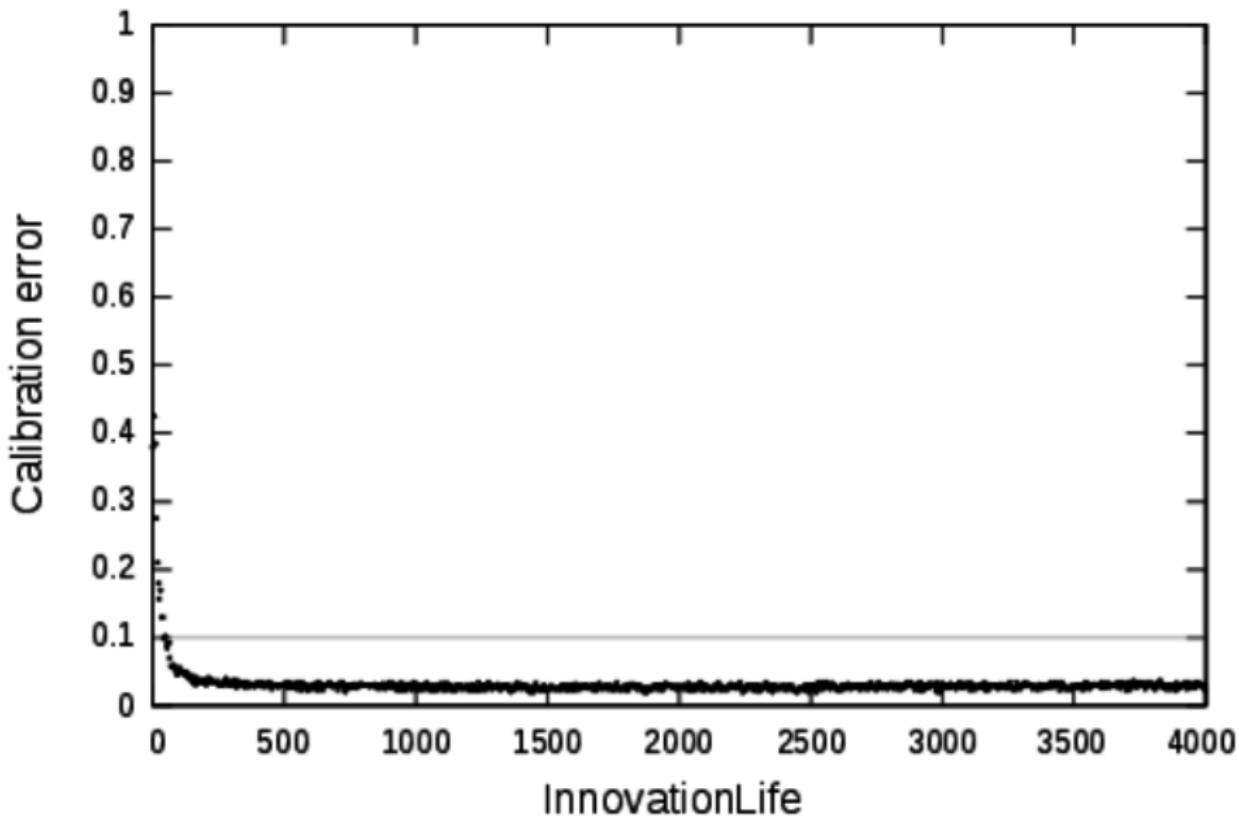
# Algorithme des profils



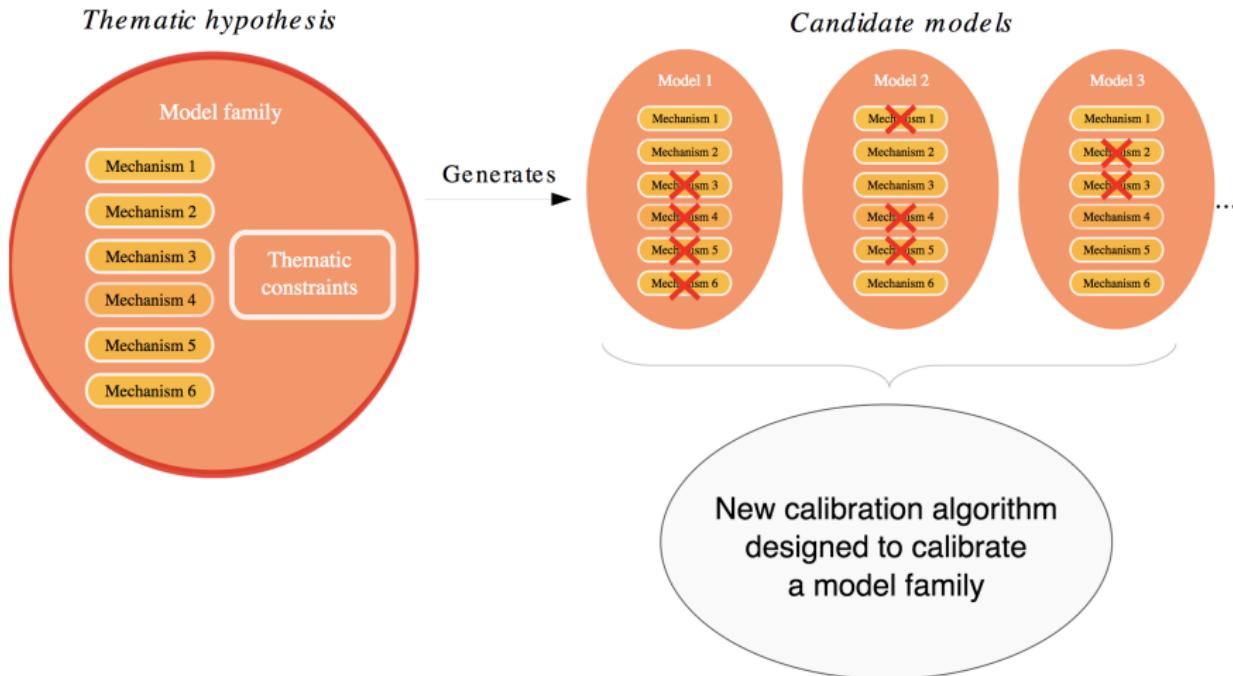
## Résultats



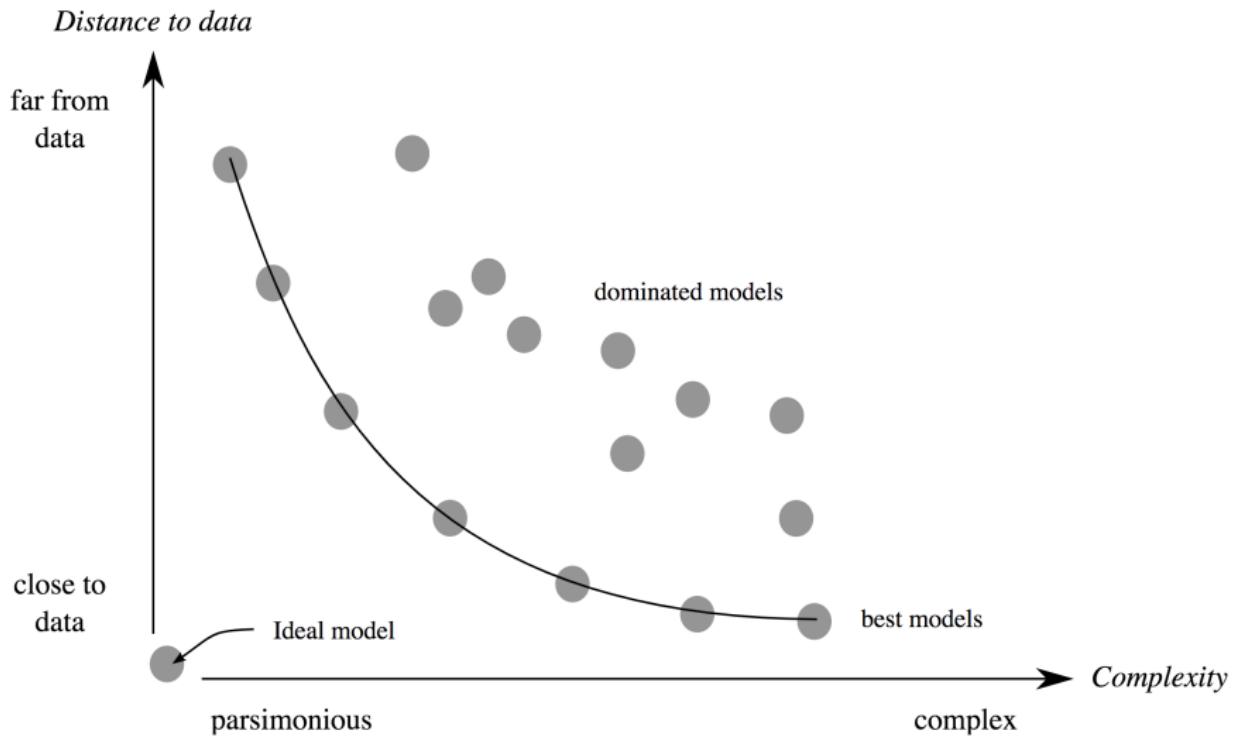
# Résultats



## *Automatisation de la confrontation entre hypothèses/mécanismes alternatifs*



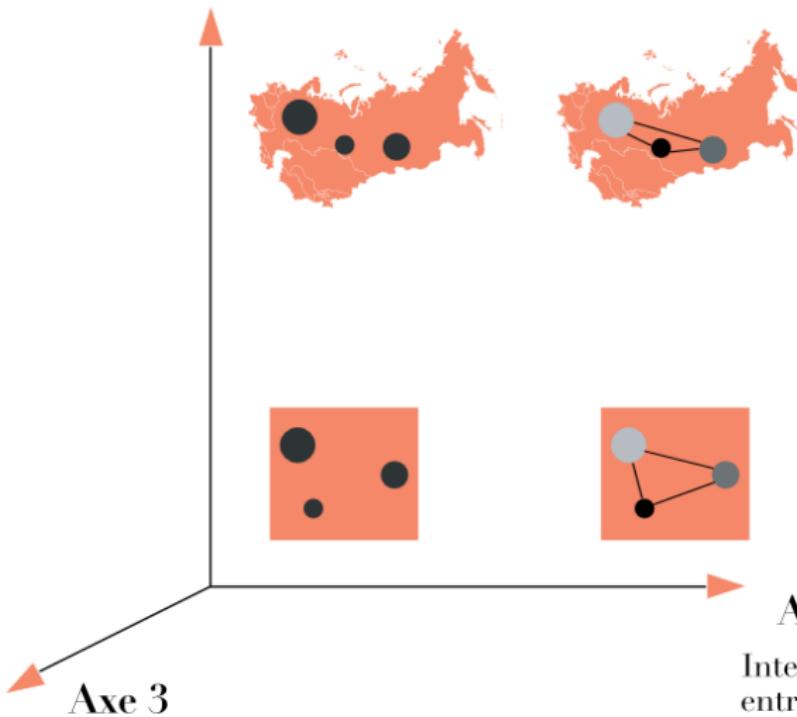
# Objectif



# 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

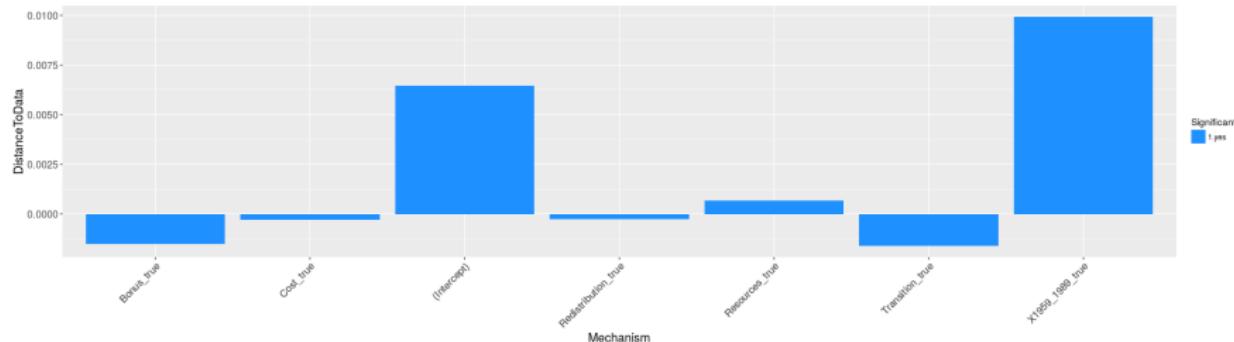
# Calibration de la famille de modèles

*Meilleur jeu de paramètres pour l'ensemble des 64 modèles obtenu par un algorithme NSGA2 par niches*

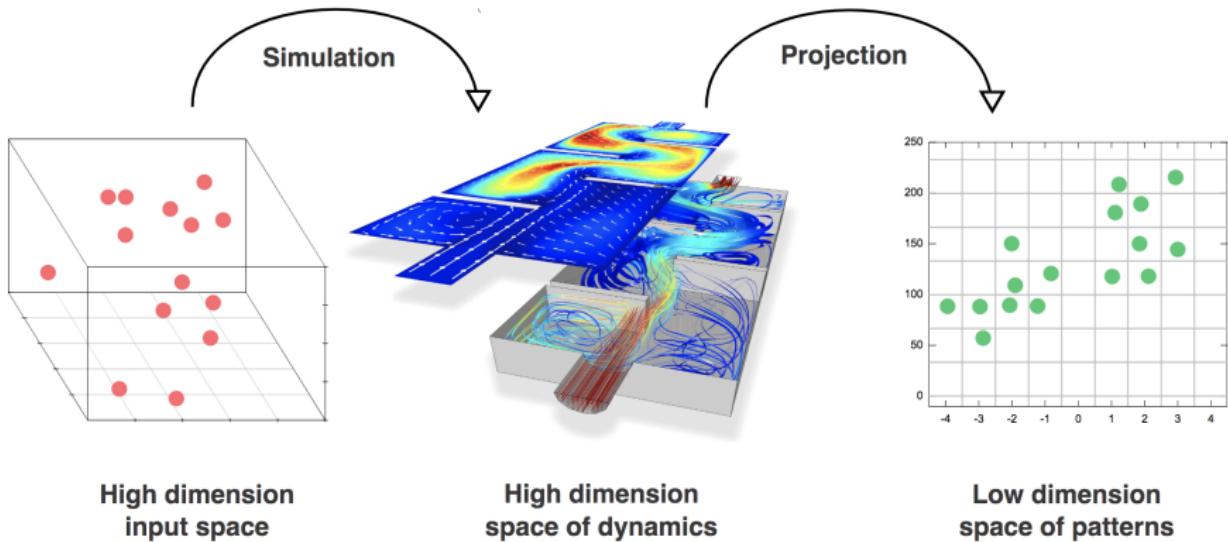
## Contribution of mechanisms to the quality of simulation (closeness to data)

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)

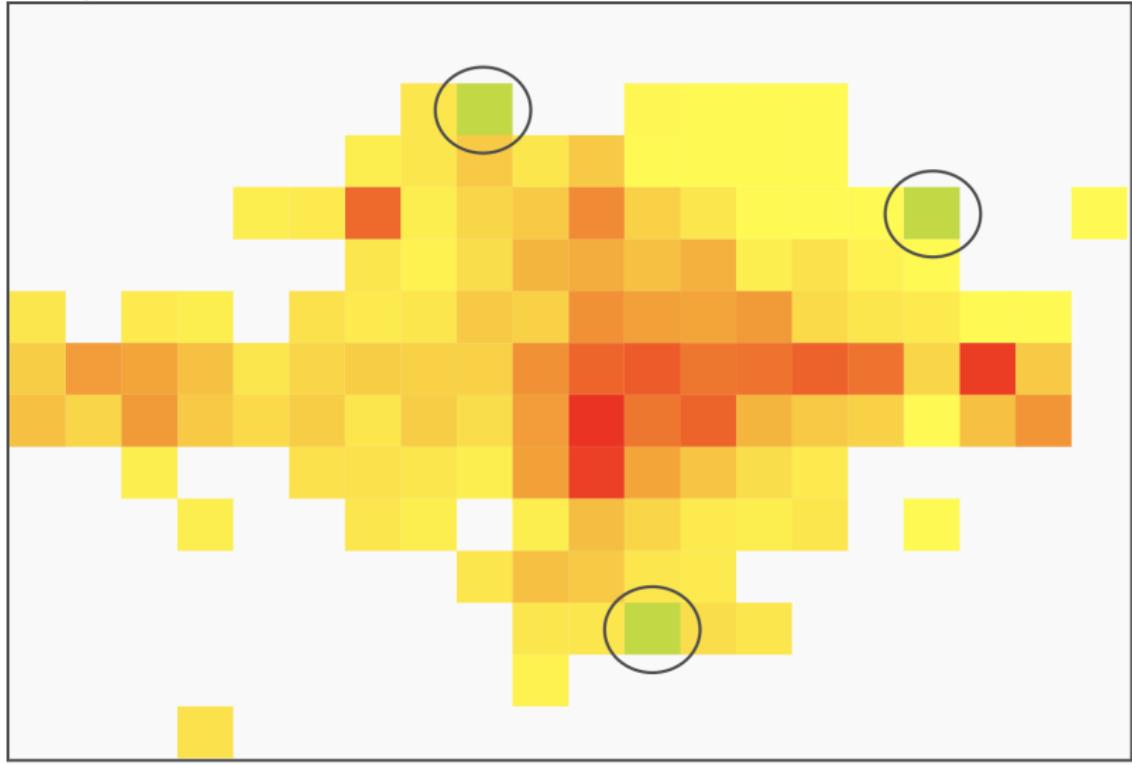


# Recherche de motifs [Chérel et al., 2015]

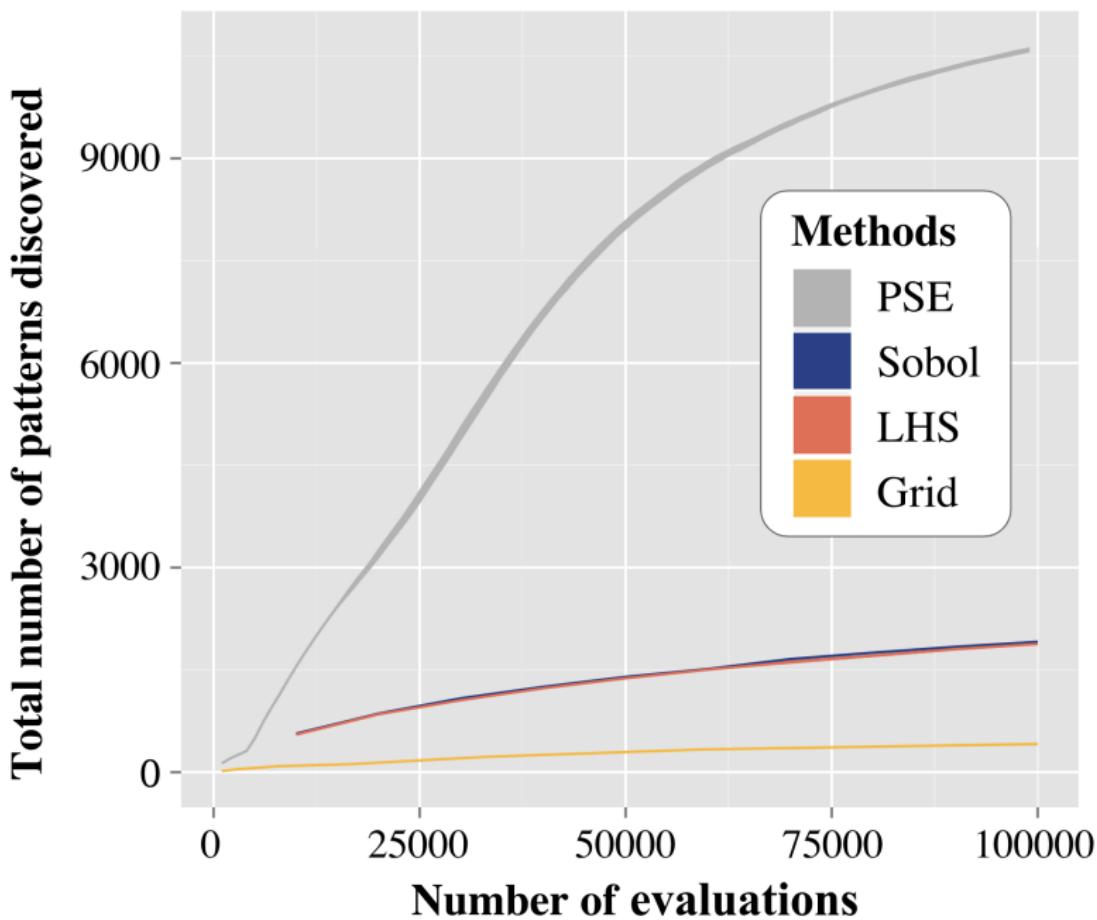


# Recherche de nouveauté

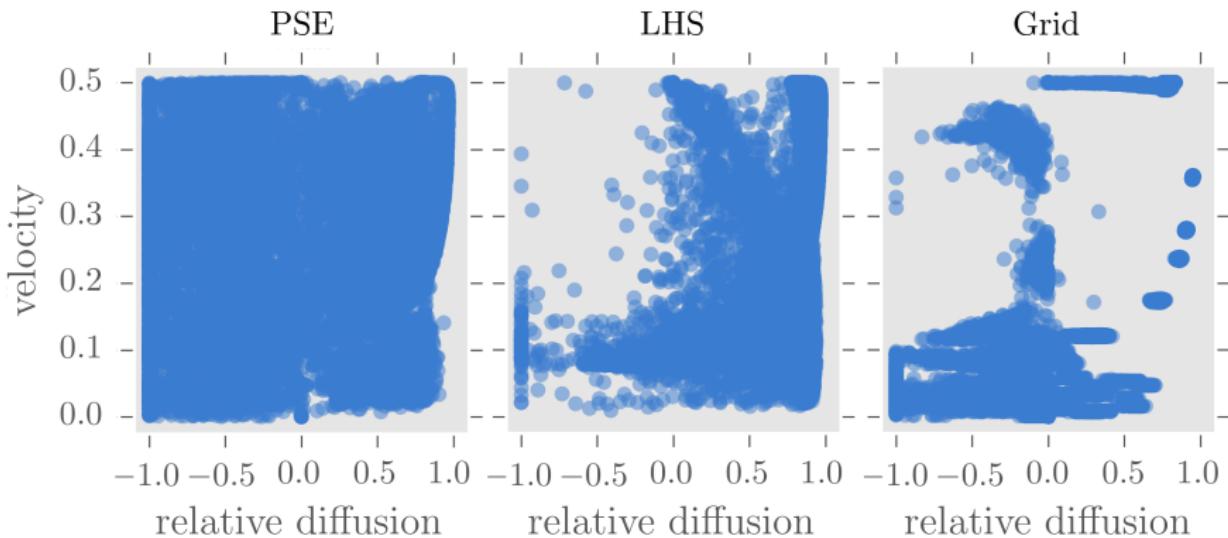
*Entrées produisant des motifs rares ont une forte fitness*



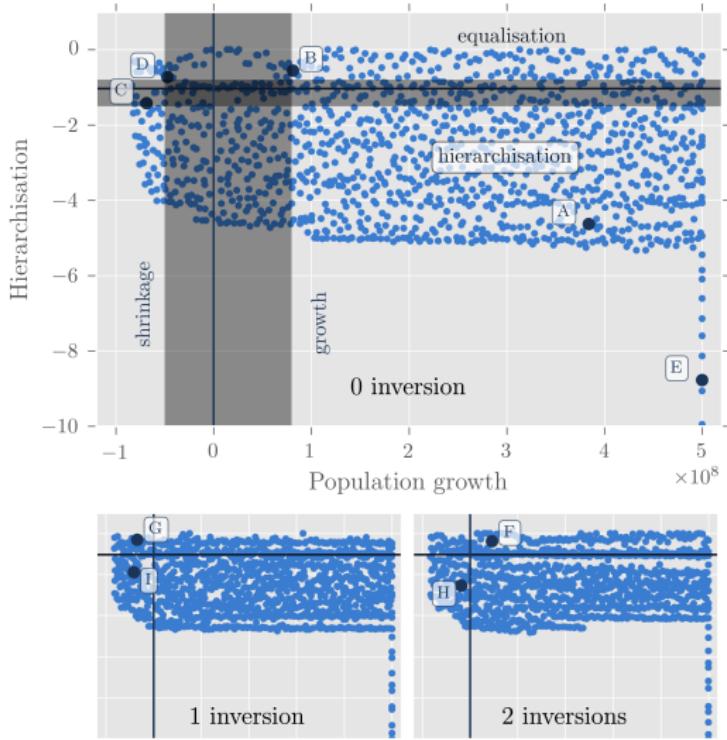
# Résultats



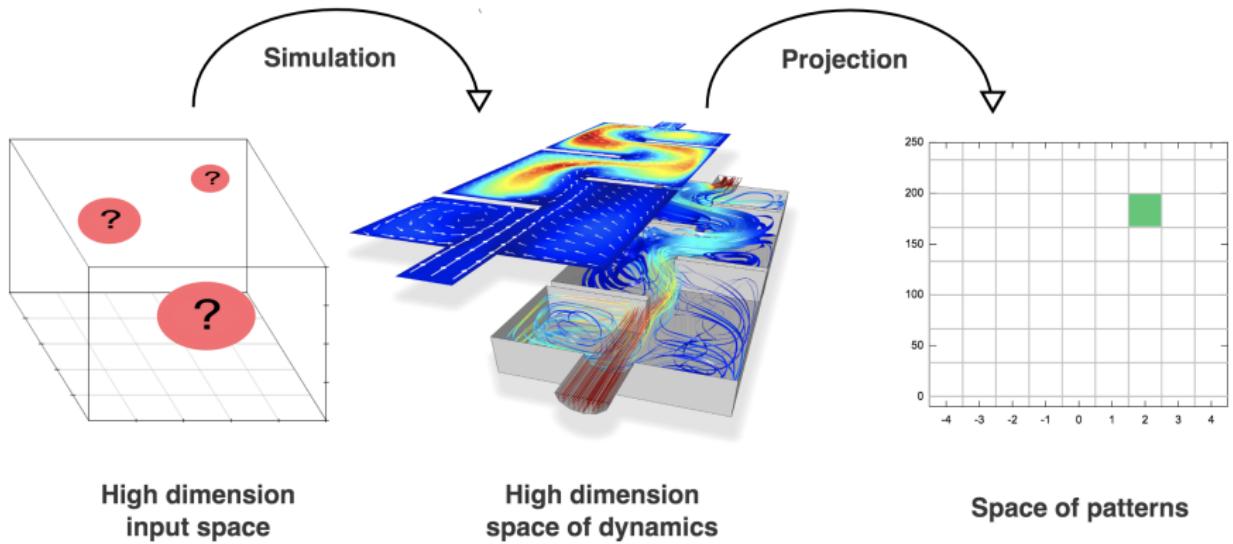
# Résultats



# Résultats

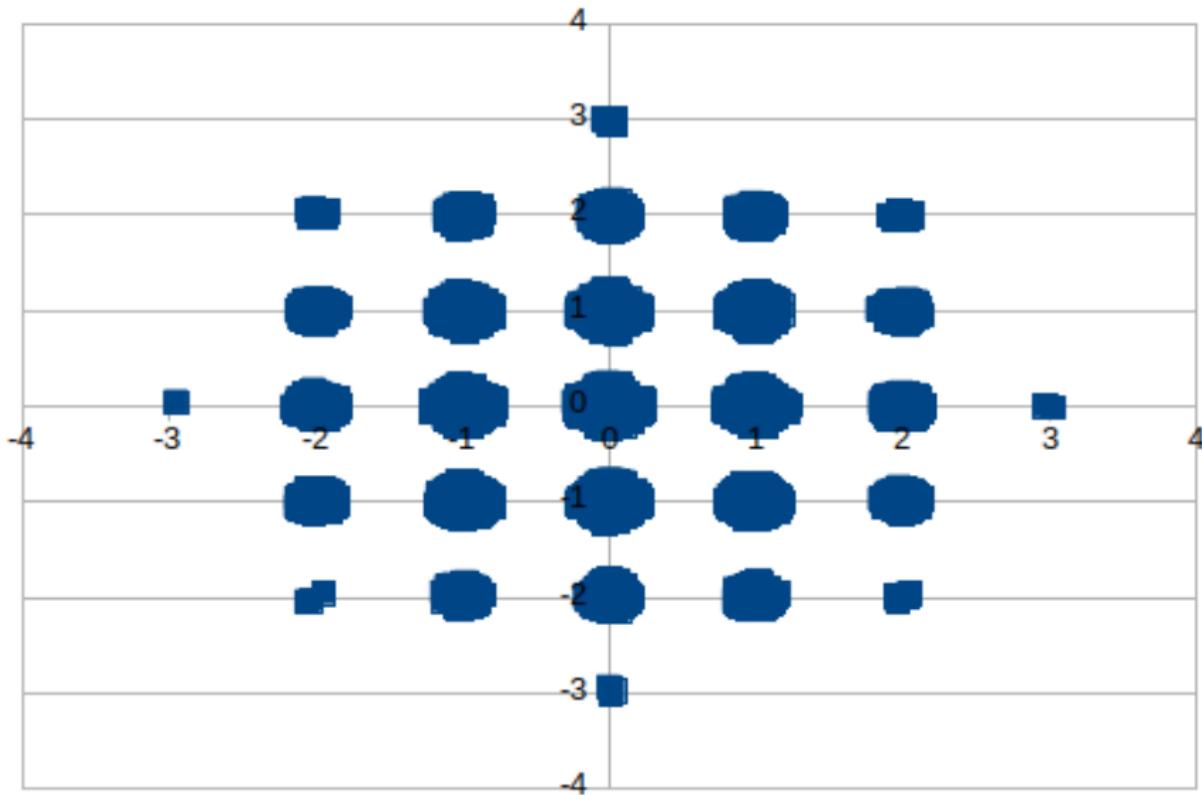


# Problème inverse

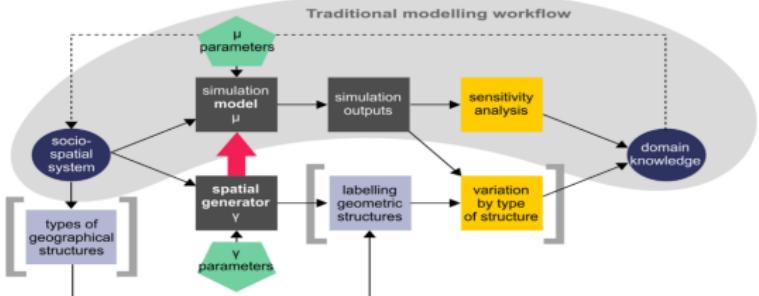


# Résultats : minimisation d'une fonction de Rastrigin

Formulation:  $\Delta \text{ pattern} < \varepsilon$

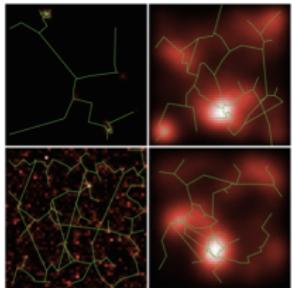


# Analyse de sensibilité spatiale

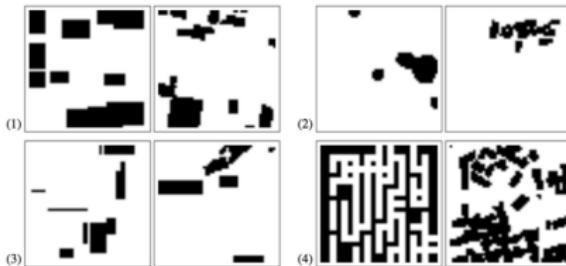


Raimbault, J., Cottineau, C., Le Texier, M., Le Nechet, F., Reuillon, R. (2019). Space Matters: Extending Sensitivity Analysis to Initial Spatial Conditions in Geosimulation Models. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 22(4).

Raimbault, J., Perret, J., & Reuillon, R. (2020). A scala library for spatial sensitivity analysis. *GISRUK 2020 Proceedings*, 32.



Raimbault, J. (2019). Second-order control of complex systems with correlated synthetic data. *Complex Adaptive Systems Modeling*, 7(1), 1-19.



Raimbault, J., Perret, J. (2019). Generating urban morphologies at large scales. In *Artificial Life Conference Proceedings* (pp. 179-186).

# Couplage de modèles

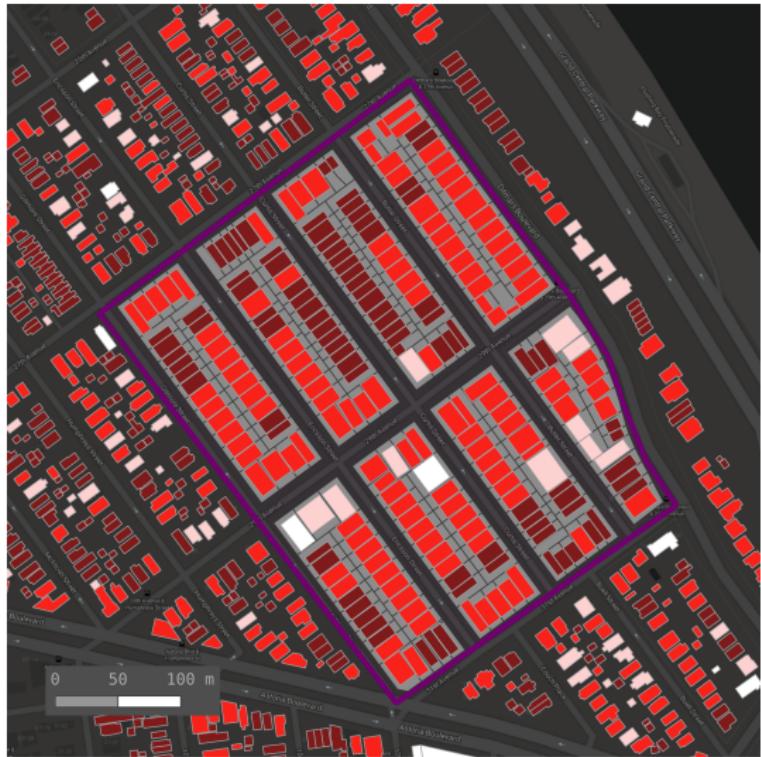
*Modèle de transport à quatre étapes modulaire en utilisant des briques et données ouvertes*

Modèles intégrés :

- MATSim (MATSim Community) pour le transport  
[W Axhausen et al., 2016]
- SPENSER (University of Leeds) pour la population synthétique  
[Spooner et al., 2021]
- QUANT (CASA, University College London) pour les interactions spatiales [Batty and Milton, 2021]
- spatialdata library (OpenMOLE community) pour les données spatiales [Raimbault et al., 2020]

Raimbault, J., & Batty, M. (2021). Estimating public transport congestion in UK urban areas with open transport models. GISRUK 2021 Proceedings.

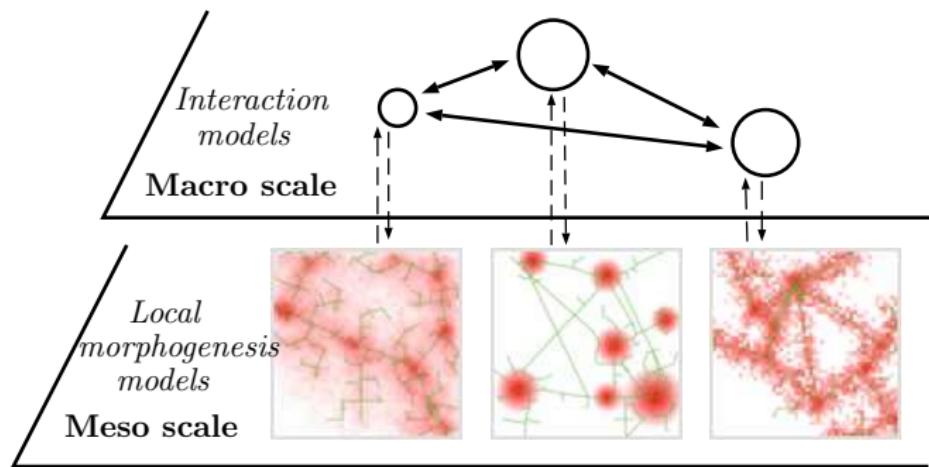
# Couplage de modèle : urbanisme et îlot de chaleur



Projet **SURe** (collaboration LASTIG, ISC-PIF, EPI-DAPO)

→ couplage du modèle SimPLU3D [Brasebin et al., 2017] avec un modèle d'îlot de chaleur urbain pour trouver des compromis entre densité et UHI.

# Couplage de modèles : vers des modèles multi-échelles



*Processus spécifiques aux échelles, le couplage nécessite des ontologies dédiées*

Raimbault, J. (2021). Strong coupling between scales in a multi-scalar model of urban dynamics. arXiv preprint arXiv:2101.12725.

Raimbault, J. (2021). A multiscale model of urban morphogenesis. arXiv preprint arXiv:2103.17241.

Raimbault, J. and Pumain, D. (2023). Innovation dynamics in multi-scalar systems of cities. ALIFE 2023.

# Synthèse : benchmark d'OpenMOLE

Type	Critères	Apache Taverna	Spark	Jupyter	R	Dakota	OpenTURNS	PEST++	OpenMOLE
Mo	Appel d'executable	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green
Mo	Execution de containers	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Green
Mo	Transmission transparente de données structurées	Green	Red	Green	Red	Red	Red	Red	Green
Me	Méthodes d'exploration	Red	Red	Red	Green	Green	Green	Green	Green
Me	Echantillonage adaptatif	Red	Red	Red	Green	Green	Green	Green	Green
Me	Optimisation globale	Red	Red	Red	Green	Green	Green	Green	Green
Me	Recherche de diversité	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Green
E	Calcul distribué	Green	Green	Red	Green	Green	Red	Green	Green
E	Zero-deploiement	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Green
C	Communauté exploration de modèles	Red	Red	Red	Yellow	Green	Green	Green	Green
I	Logiciel installable	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green
I	Service en ligne	Green	Green	Green	Green	Red	Red	Red	Green
I	Langage généraliste	Red	Green	Green	Green	Red	Green	Red	Green
I	Système de workflow	Green	Red	Red	Red	Red	Green	Red	Green
I	Programmation Graphique	Green	Red	Red	Red	Red	Green	Red	Red

# Utiliser OpenMOLE

Documentation Demo Download Community

The screenshot shows the OpenMOLE homepage with a dark blue background. At the top right are links for Documentation, Demo, Download, and Community. In the center-left, there's a small cartoon robot icon above the word "OpenMOLE" in large yellow letters. Below it is a description: "Free and open source model exploration software." To the right, there's a diagram illustrating the adaptive design of experiments. It features several vertical bars of different heights, some with open circles at their tops and others with solid dots. Three circular icons are placed around these bars: one labeled "to gain knowledge", another labeled "Adaptive design of experiments", and a third labeled "on your model dynamics". At the bottom left are two buttons: "Learn more" and "Get Started".

Documentation Demo Download Community

**OpenMOLE**

Free and open source model exploration software.

to gain knowledge

Adaptive design of experiments

on your model dynamics.

Learn more

Get Started

- Executable java sans installation sur <https://openmole.org>, code source à compiler sur <https://github.com/openmole/openmole>
- Demande d'une instance en ligne personnelle sur <https://my.openmole.org> : contacter l'équipe de développement

# Aide et contribution

The screenshot shows the homepage of the chat.openmole.org website. On the left, there is a sidebar titled "Discussions" containing a list of channels with their respective icons and names. The main content area has a header "Welcome to chat.openmole.org" and a section "Some ideas to get you started". It includes three main sections: "Create channels", "Join rooms", and "Mobile apps". Below these are sections for "Desktop apps" (Windows, Linux, Mac) and "Documentation". At the bottom, there is a "Welcome to the OpenMOLE community Rocket.Chat!" section with information about the help channel and ticket system.

Discussions

- Documentation
- Chapitre 3
- Chapitre 4
- Chapitre 2
- Presentation ExModelo UR REVERSAL - L...
- zombie island
- Glasses' team
- error netlogo

Channels

- # dev
- # general
- # codingcamp
- # help
- # exmodelo-school
- # myopenmole
- # shift-chat
- # explorationMap
- # exmodelo-2021
- # egi
- # exmodelo-2020

Welcome to chat.openmole.org

Some ideas to get you started

Create channels

Join rooms

Mobile apps

Discover public channels and teams in the workspace directory.

Create Channel

Open directory

Google Play App Store

Desktop apps

Install Rocket.Chat on your preferred desktop platform.

Windows Linux Mac

Documentation

Learn how to unlock the myriad possibilities of Rocket.Chat.

See documentation

Welcome to the OpenMOLE community Rocket.Chat!

Here you can ask for help on the #help channel.

Contact the dev team on the #dev channel, or chat with other members of the community on the #general channel. The preferred language on this chat is English.

For issues on OpenMOLE usage and model exploration, you can also use this ticket system: [ask.openmole.org](https://ask.openmole.org)

Chat très réactif : <https://chat.openmole.org>

Coding camp annuels début juillet : n'hésitez pas à nous contacter pour participer en 2024 !

Communauté à l'IGN (LASTIG, Strudel) : Paul Chapron, Julien Perret, Juste Rimbault



About   Programme   Trainers   Venue   Apply   Contact   Sponsors

# eX Modelo Workshop

Model Evaluation & Exploration with OpenMOLE

November 13th and 14th, 2023 Paris - France

Apply

Journées de formation ExModelo (ISC-PIF, novembre)  
<https://workshop.exmodelo.org/> : candidatures ouvertes  
(participation gratuite), dans l'héritage des 3 éditions de l'école d'été

## NOTRE ENTREPRISE

### RÉFÉRENCES SCIENTIFIQUES

10+  
ans de recherche

50+  
communications internationales

100+  
supports modélisateur

8  
supports de thèse

### COOPération AVEC LA RECHERCHE PUBLIQUE

2  
consultants en recherche CNRS

Participation au développement de la plateforme libre d'exploration de modèles

**OpenMOLE**  
the model exploration software

### UNE ENTREPRISE ÉTHIQUE

Trempline est une SCIC

- 1 personne = 1 voix
- pas de valorisation du capital
- 2/3 des bénéfices annuels minimum réinvestis

**Open-source**  
Notre expertise est à vendre, pas notre logiciel

# Résumé du positionnement d'OpenMOLE

*Un saut qualitatif dans la connaissance extraite d'un modèle de simulation par les méthodes d'exploration des modèles*

Exemples pluridisciplinaires : SimpopLocal [Schmitt et al., 2015], Marius [Chérel et al., 2015], modélisation en écologie [Lavallée et al., 2018], en épidémiologie [Arduin, 2018], etc.

## Caractéristiques principales :

- Role unique des axes complémentaires de l'accès aux environnements, de la disponibilité des méthodes, et de l'embarquement des modèles.
- Construction itérative et intégrée des modèles et théories, en utilisant l'ensemble des dimensions de la connaissance favorisées par la simulation et le calcul (modélisation, théorie, empirique, données, méthodes, outils [Raimbault, 2017]).
- Couplage des modèles et reproductibilité au cœur de l'approche par workflow [Passerat-Palmbach et al., 2017].

**!! Une brique essentielle pour la partie simulation du futur Jumeau Numérique !!**

# References I

-  Arduin, H. (2018).  
*Modélisation mathématique des interactions entre pathogènes chez l'hôte humain: Application aux virus de la grippe et au pneumocoque.*  
PhD thesis, Université Paris-Saclay.
-  Batty, M. and Milton, R. (2021).  
A new framework for very large-scale urban modelling.  
*Urban Studies*, 58(15):3071–3094.
-  Brasebin, M., Chapron, P., Chérel, G., Leclaire, M., Lokhat, I., Perret, J., and Reuillon, R. (2017).  
Apports des méthodes d'exploration et de distribution appliquées à la simulation des droits à bâtir.  
In *Spatial Analysis and GEOmatics 2017*.

## References II

-  Chérel, G., Cottineau, C., and Reuillon, R. (2015).  
Beyond corroboration: Strengthening model validation by looking for unexpected patterns.  
*PLoS ONE*, 10(9):e0138212.
-  Cottineau, C. (2014).  
*L'évolution des villes dans l'espace post-soviétique. Observation et modélisations.*  
PhD thesis, Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne.
-  Lavallée, F., Alvarez, I., Dommangeat, F., Martin, S., Reineking, B., and Smadi, C. (2018).  
A dynamical model for the growth of a stand of japanese knotweed including mowing as a management technique.  
In *Conference on Complex Systems 2018*.

## References III

-  Openshaw, S., Charlton, M., Wymer, C., and Craft, A. (1987).  
A mark 1 geographical analysis machine for the automated analysis  
of point data sets.  
*International Journal of Geographical Information System*,  
1(4):335–358.
-  Passerat-Palmbach, J., Reuillon, R., Leclaire, M., Makropoulos, A.,  
Robinson, E. C., Parisot, S., and Rueckert, D. (2017).  
Reproducible large-scale neuroimaging studies with the openmole  
workflow management system.  
*Frontiers in neuroinformatics*, 11:21.
-  Pumain, D. (2003).  
Une approche de la complexité en géographie.  
*Géocarrefour*, 78(1):25–31.

## References IV



Pumain, D. (2012).

Urban systems dynamics, urban growth and scaling laws: The question of ergodicity.

In *Complexity Theories of Cities Have Come of Age*, pages 91–103. Springer.



Pumain, D. (2018).

An evolutionary theory of urban systems.

In *International and Transnational Perspectives on Urban Systems*, pages 3–18. Springer.



Rambault, J. (2017).

An applied knowledge framework to study complex systems.

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

## References V



Raimbault, J. (2018).

Extracting knowledge from simulation models: trends and perspectives from the viewpoint of quantitative geography.

In *Conference on Complex Systems 2018*.



Raimbault, J. (2019).

Second-order control of complex systems with correlated synthetic data.

*Complex Adaptive Systems Modeling*, 7(1):1–19.



Raimbault, J. (2020).

Relating complexities for the reflexive study of complex systems.

*Theories and Models of Urbanization: Geography, Economics and Computing Sciences*, pages 27–41.

## References VI



Rimbault, J. (2021a).

Modeling the co-evolution of cities and networks.

In *Handbook of cities and networks*, pages 166–193. Edward Elgar Publishing.



Rimbault, J. (2021b).

A multiscale model of urban morphogenesis.

*arXiv preprint arXiv:2103.17241*.



Rimbault, J. (2021c).

Strong coupling between scales in a multi-scalar model of urban dynamics.

*arXiv preprint arXiv:2101.12725*.

## References VII

-  Rimbault, J., Banos, A., and Doursat, R. (2014).  
A hybrid network/grid model of urban morphogenesis and optimization.  
In *4th International Conference on Complex Systems and Applications*, pages 51–60.
-  Rimbault, J. and Batty, M. (2021).  
Estimating public transport congestion in uk urban areas with open transport models.  
GIS Research UK (GISRUK).
-  Rimbault, J., Cottineau, C., Le Texier, M., Le Nechet, F., and Reuillon, R. (2019).  
Space matters: Extending sensitivity analysis to initial spatial conditions in geosimulation models.  
*Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 22(4).

## References VIII



Rimbault, J. and Perret, J. (2019).

Generating urban morphologies at large scales.

In *Artificial Life Conference Proceedings*, pages 179–186. MIT Press  
One Rogers Street, Cambridge, MA 02142-1209, USA  
journals-info ....



Rimbault, J., Perret, J., and Reuillon, R. (2020).

A scala library for spatial sensitivity analysis.

GISRUK.



Reuillon, R., Schmitt, C., De Aldama, R., and Mouret, J.-B. (2015).  
A new method to evaluate simulation models: The calibration profile  
(cp) algorithm.

*Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 18(1):12.

# References IX



Rey-Coyrehourcq, S. (2015).

*Une plateforme intégrée pour la construction et l'évaluation de modèles de simulation en géographie.*

PhD thesis, Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne.



Sanders, L., Pumain, D., Mathian, H., Guérin-Pace, F., and Bura, S. (1997).

Simpop: a multiagent system for the study of urbanism.

*Environment and Planning B*, 24:287–306.



Schmitt, C. (2014).

*Modélisation de la dynamique des systèmes de peuplement: de SimpopLocal à SimpopNet.*

PhD thesis, Paris 1.

# References X

-  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.
-  Varenne, F. (2017).  
*Théories et modèles en sciences humaines. Le cas de la géographie.*  
Editions Matériologiques.

## References XI

-  W Axhausen, K., Horni, A., and Nagel, K. (2016).  
*The multi-agent transport simulation MATSim.*  
Ubiquity Press.