

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

J. Raimbault^{1,2,3,4,*}

* `juste.raimbault@ign.fr`

¹ LASTIG, IGN-ENSG

²CASA, UCL

³UPS CNRS 3611 ISC-PIF

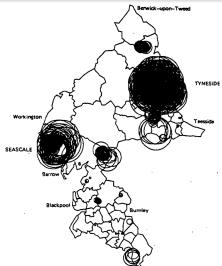
⁴UMR CNRS 8504 Géographie-cités

Journée d'étude Big Data et données spatialisées

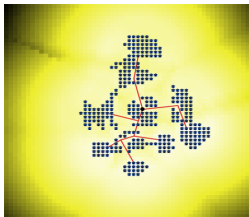
IGN

29 Juin 2023

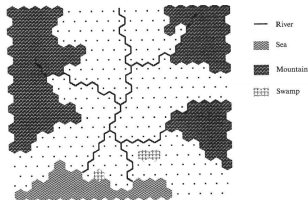
Modélisation et simulation en géographie



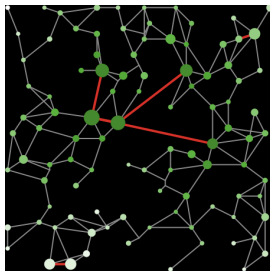
*Machine d'analyse géographique
[Openshaw et al., 1987]*



*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

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.

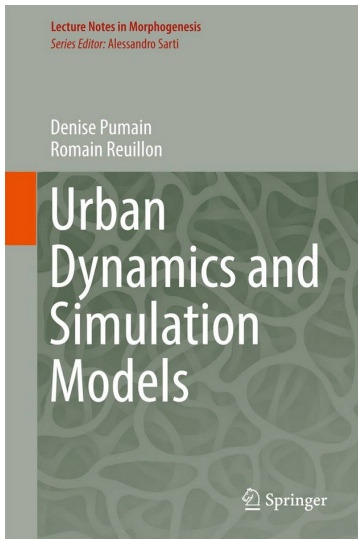
Constat d'un manque d'outils

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 Geodiversity



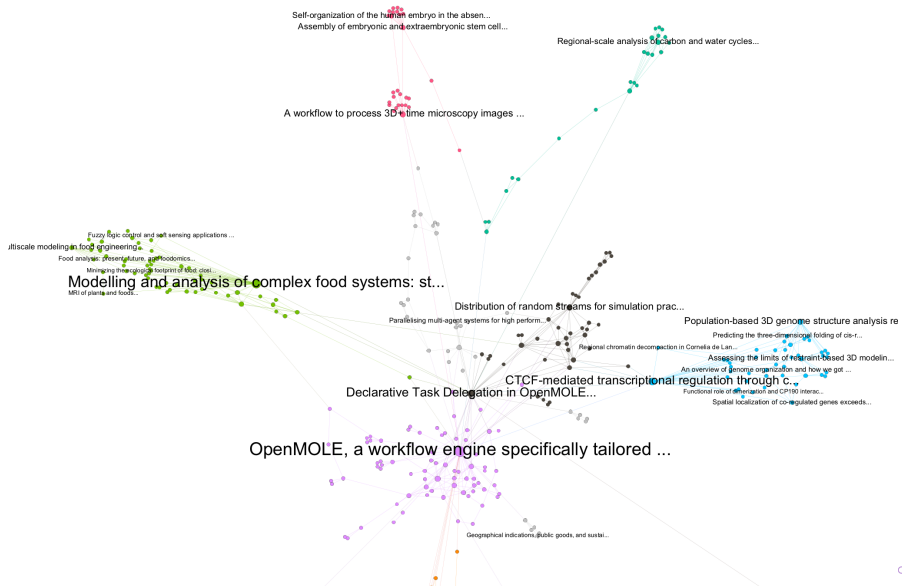
Développement de la théorie évolutive des villes [Pumain, 2018]

- 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



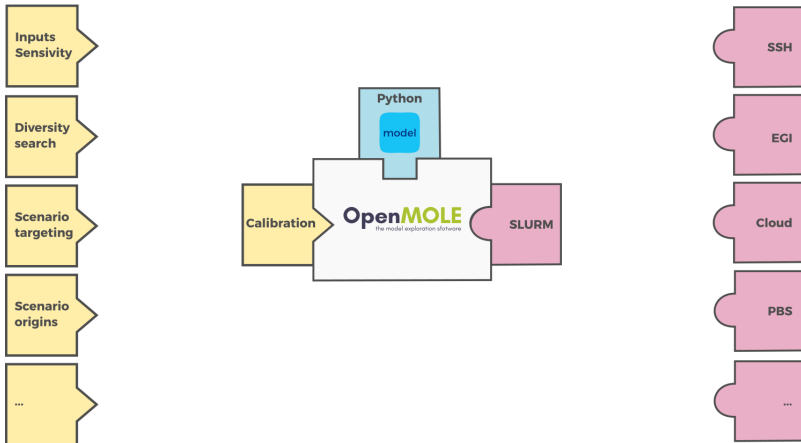
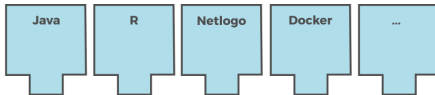
OpenMOLE

Environnement scientifique d'OpenMOLE [Raimbault, 2018]

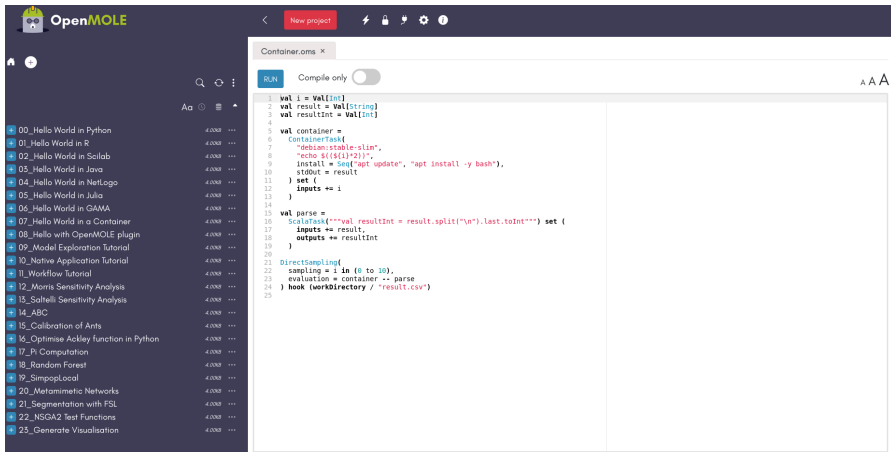


Principes d'OpenMOLE

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

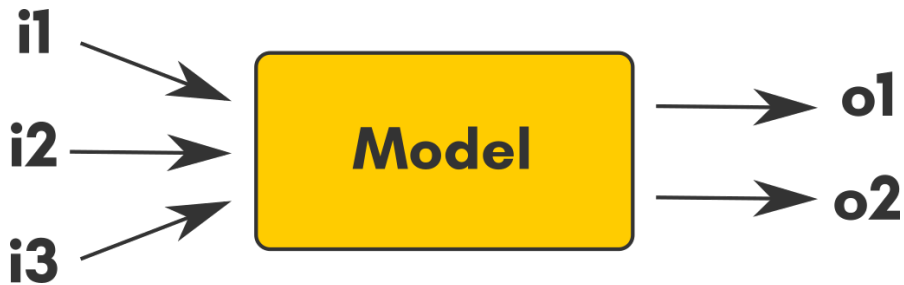


Une interface web ergonomique



The screenshot displays the OpenMOLE web interface. On the left, a sidebar lists 25 projects, each with a small icon and a duration of 4:00. The main area is titled "Container.ams x" and features a "RUN" button and a "Compile only" toggle. Below this, a code editor shows Scala code for a container task. The code defines variables for iteration, container configuration, and task execution, including a hook for saving results to a CSV file.

```
1 val i = Val[Int]
2 val result = Val[String]
3 val resultInt = Val[Int]
4
5 val container =
6   ContainerTask(
7     "debian:stable-slim",
8     "echo ${i}*2)",
9     install = Seq("apt update", "apt install -y bash"),
10    stdout = result
11  ) set {
12    inputs += i
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
```



C
R
C++
Java
Scala
Scilab
Octave
Python
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

```
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")
```

- 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.

```
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)
    )
)
```

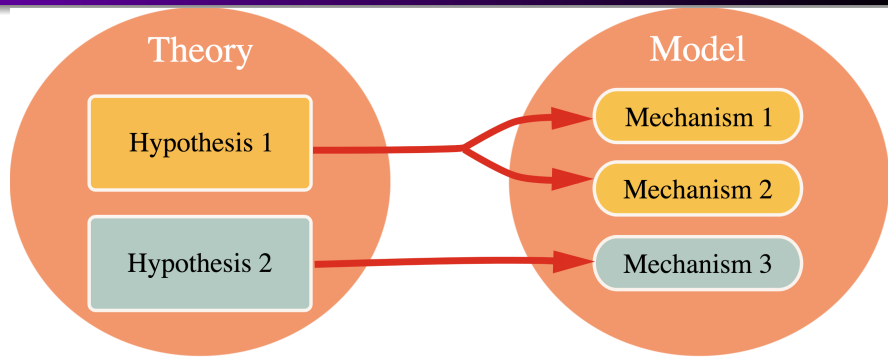
Environnements de calcul disponibles :

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

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



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

Evaluation: Comment s'assurer de

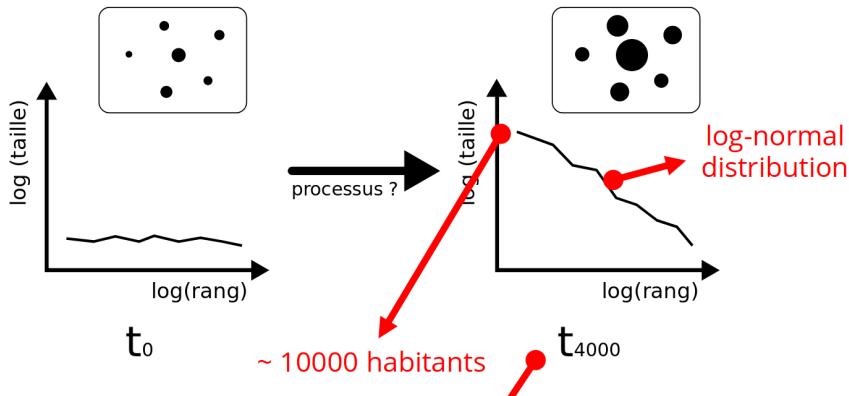
- 1 La suffisance des mécanismes ?
- 2 La nécessité des mécanismes ?
- 3 L'unicité des mécanismes ?

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:

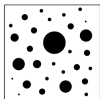
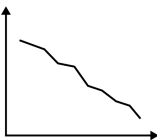
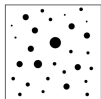
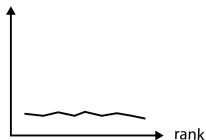


Résultats de calibration

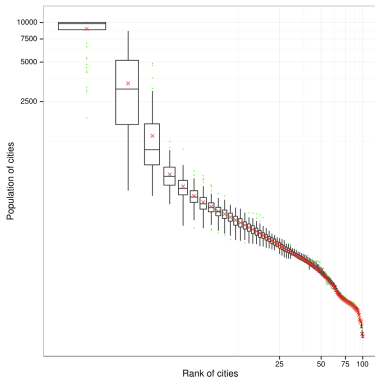
Pas de compromis entre les trois objectifs.

Searched pattern

log population



Produced pattern

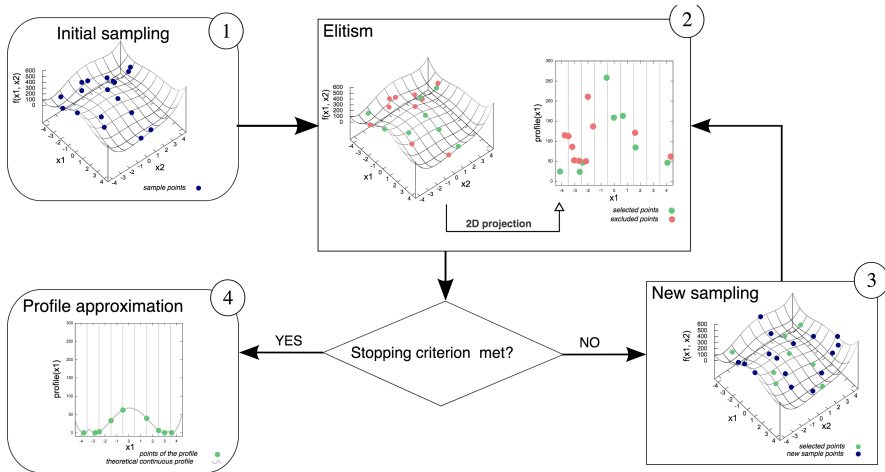


Performances: gestion de la stochasticité (gain x100), calcul distribué (gain x1000)

Nouvel algorithme

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

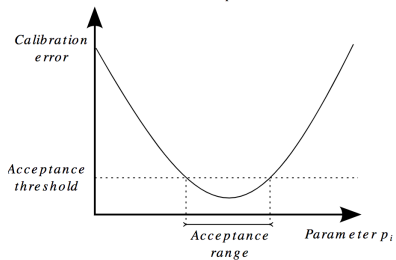
Algorithme des profils



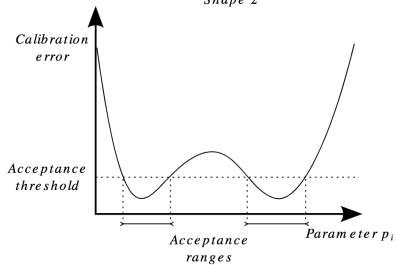
Meilleure calibration pour des pas fixés le long d'une dimension

Algorithmes des profils

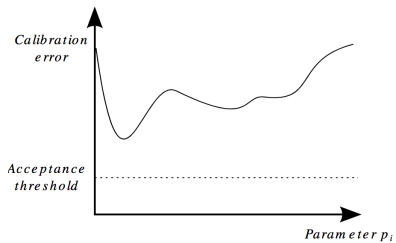
Shape 1



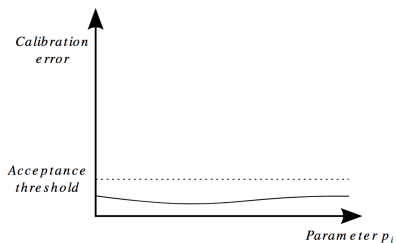
Shape 2



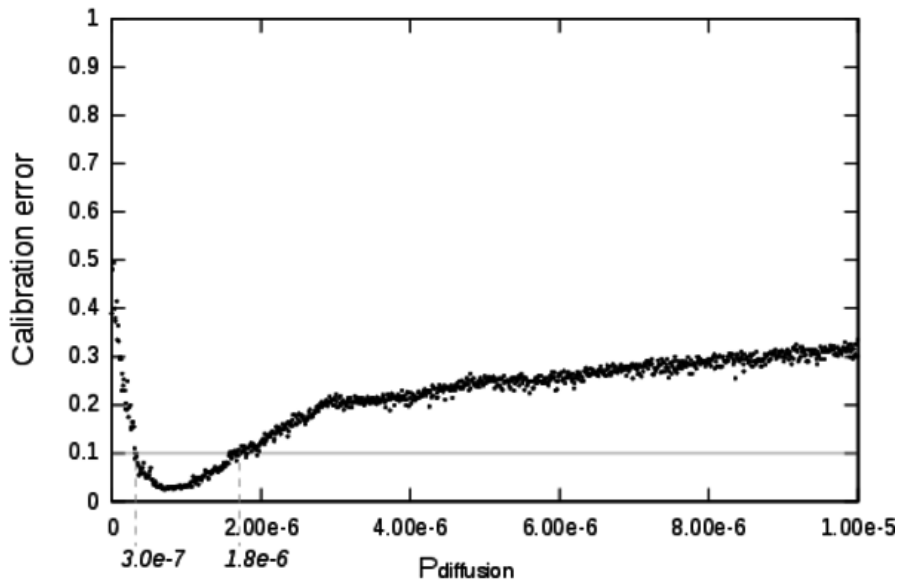
Shape 3



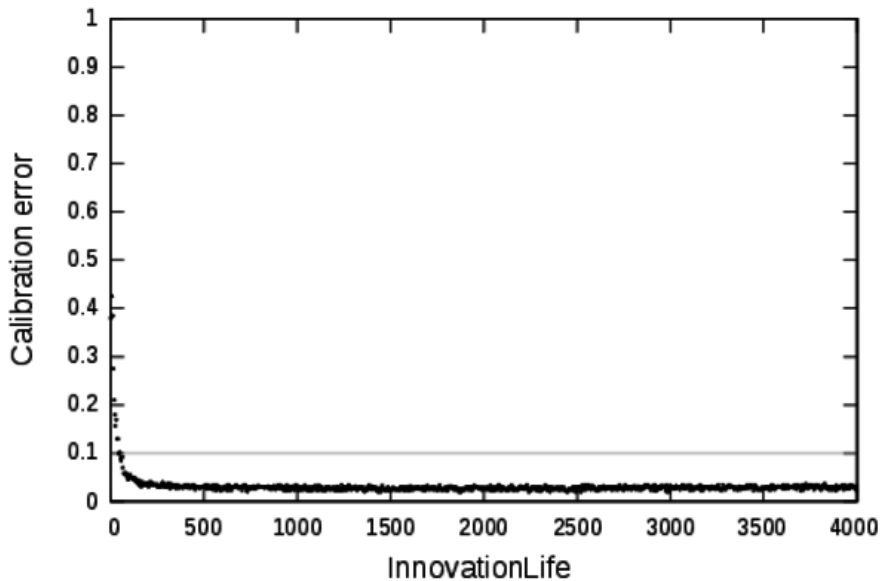
Shape 4



Résultats

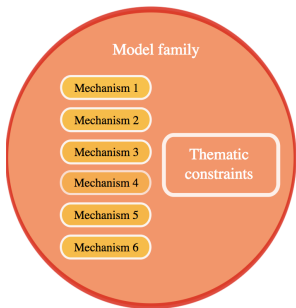


Résultats



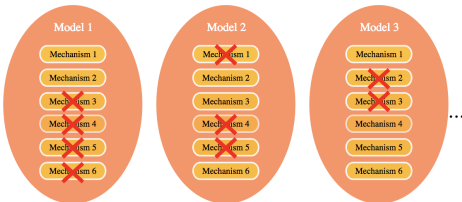
Automatisation de la confrontation entre hypothèses/mécanismes alternatifs

Thematic hypothesis



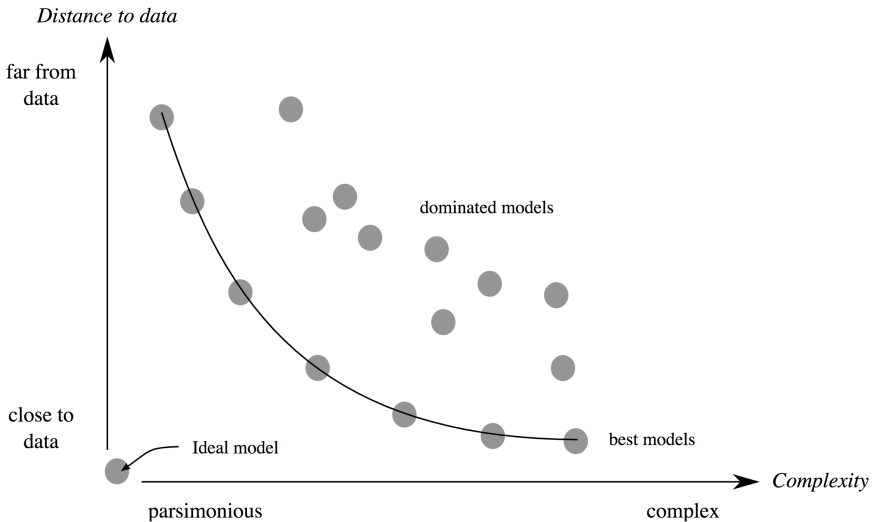
Generates

Candidate models



New calibration algorithm
designed to calibrate
a model family

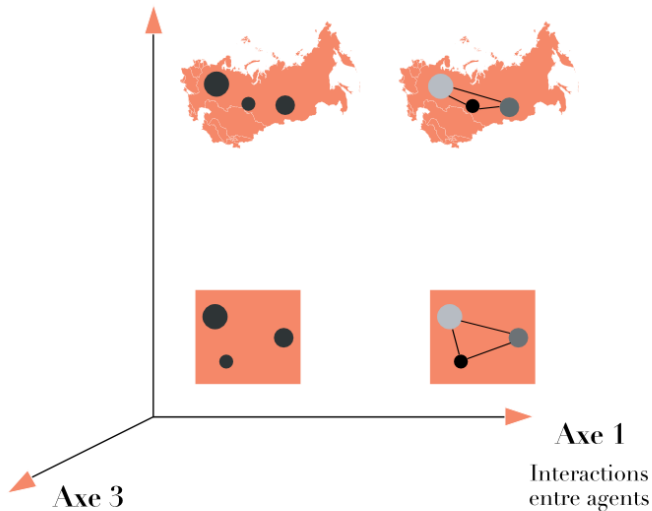
Objectif



Multi-modélisation (64 modèles)

Axe 2

Interactions entre
les agents et
l'environnement



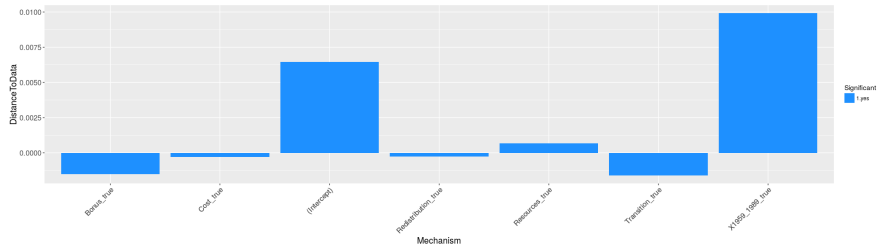
Calibration de la famille de modèles

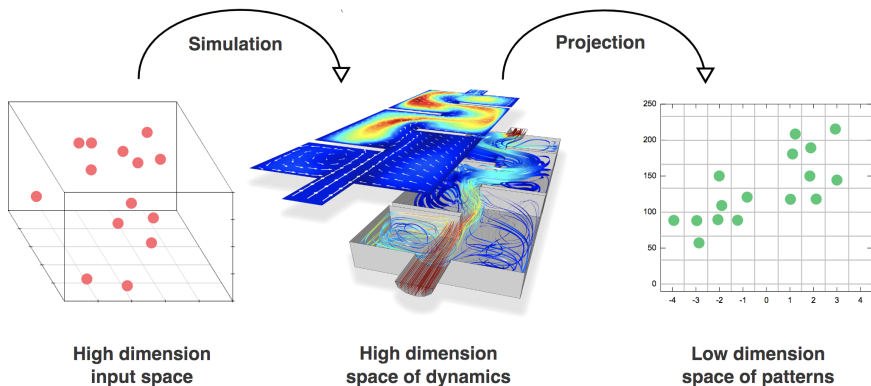
Meilleur jeu de paramètres pour l'ensemble des 64 modèles obtenu par un algorithme NSGA2 par niches

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

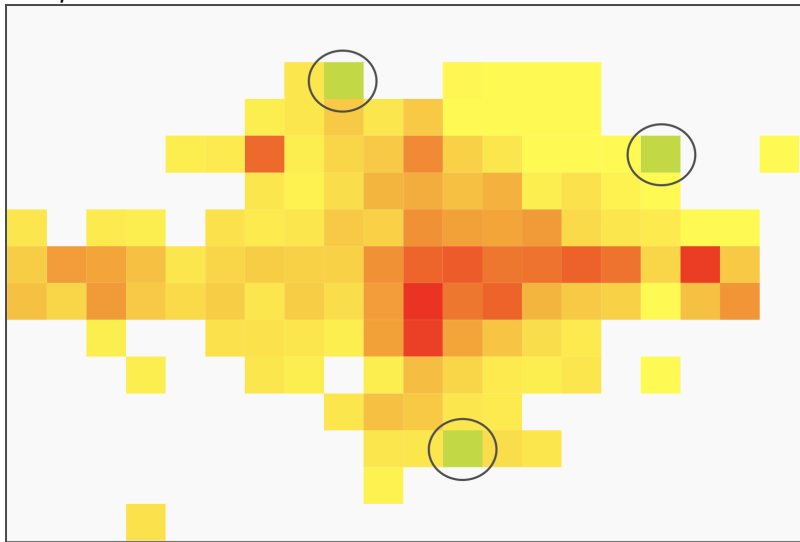
Models with different combination of mechanisms have been calibrated intensively against empirical data, using generic algorithms for more than 100000 generations. This plot shows the results of a regression explaining one measure of the quality of models (a small difference between simulated and empirical 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.

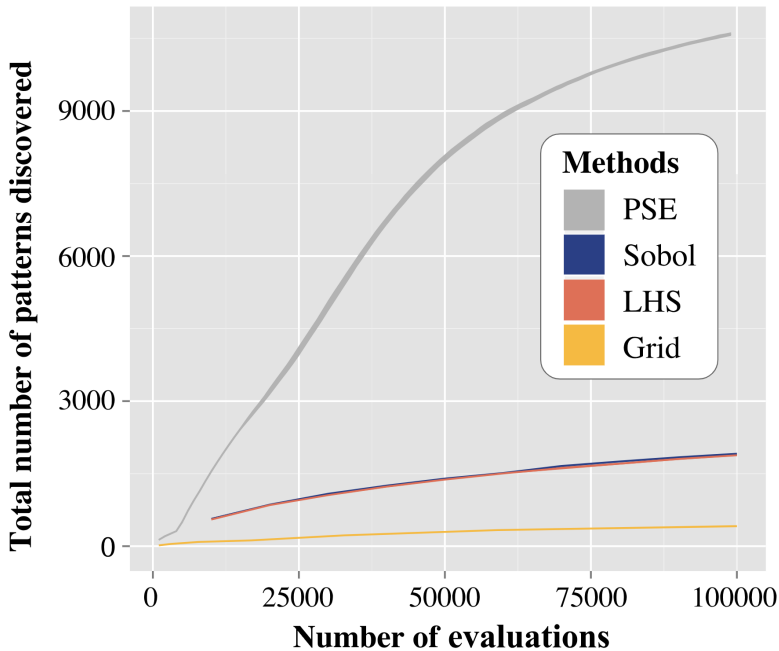
Statistical Significance (% of error)

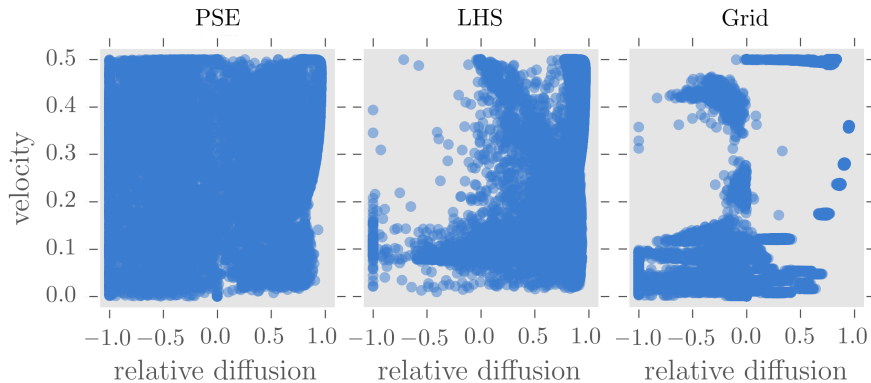




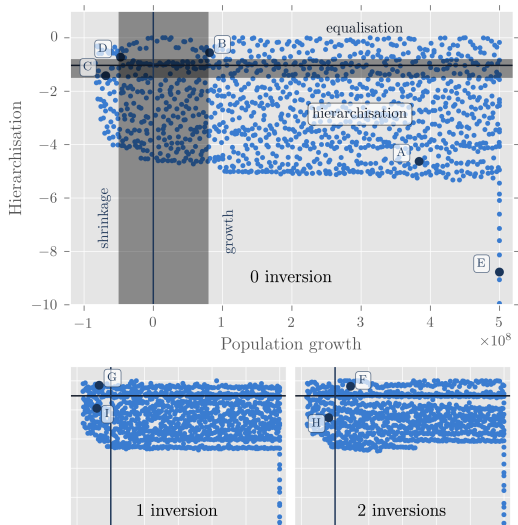
Entrées produisant des motifs rares ont une forte fitness



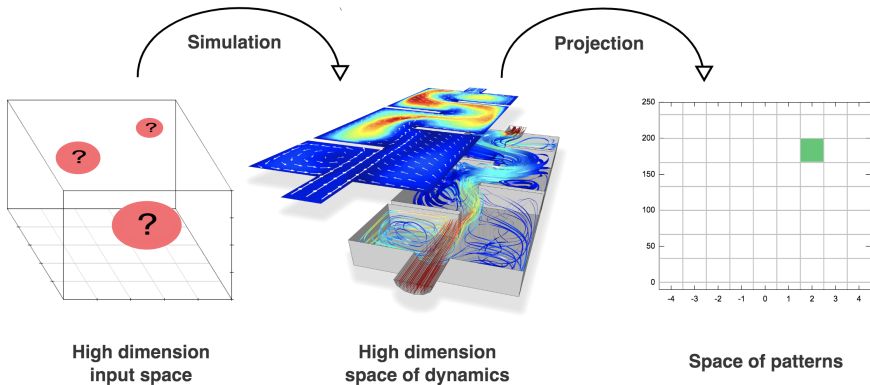




Résultats

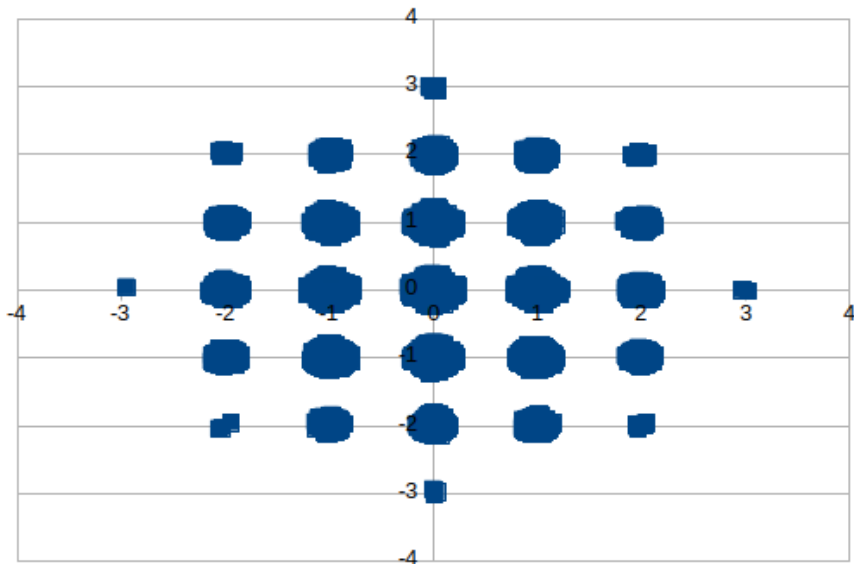


Problème inverse

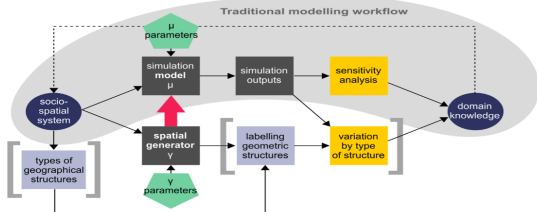


Résultats : minimisation d'une fonction de Rastrigin

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

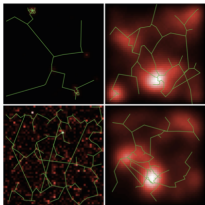


Analyse de sensibilité spatiale

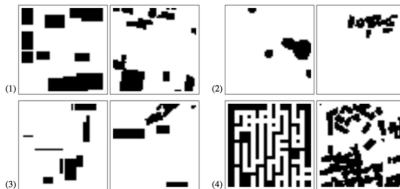


Raimbault, J., Cottineau, C., Le Texier, M., Le Nechet, F., Reuillon, R. (2019). Space Matters: Extending Sensitivity Analysis to Initial Spatial Conditions in Geosimulation Models. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 22(4).

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).

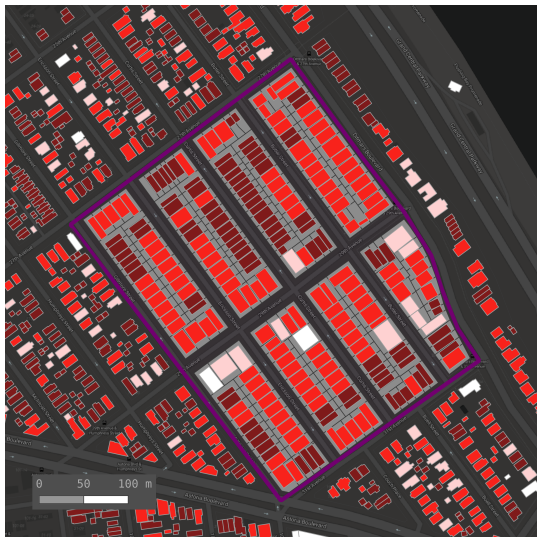
Modèle de transport à quatre étapes modulaire en utilisant des briques et données ouvertes

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. GISRUUK 2021 Proceedings.

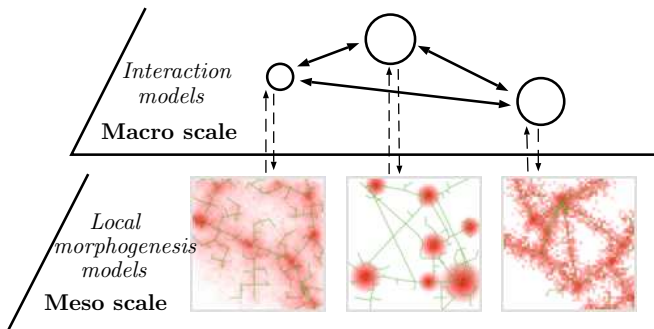
Couplage de modèle : urbanisme et îlot de chaleur



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

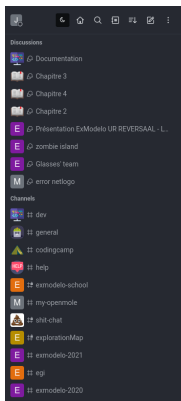
Type	Critères	Apache Taverna	Spark	Jupyter	R	Dakota	OpenTURNS	PEST++	OpenMOLE
Mo	Appel d'exécutable	■	■	■	■	■	■	■	■
Mo	Execution de containers	■	■	■	■	■	■	■	■
Mo	Transmission transparente de données structurées	■	■	■	■	■	■	■	■
Me	Méthodes d'exploration	■	■	■	■	■	■	■	■
Me	Échantillonnage adaptatif	■	■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

Utiliser OpenMOLE

The screenshot shows the OpenMOLE website homepage. At the top right, there are navigation links: [Documentation](#), [Demo](#), [Download](#), and [Community](#). On the left side, there is a logo of a robot wearing a yellow hard hat, followed by the text "OpenMOLE" in a large, bold, yellow font. Below the logo, the text reads "Free and open source model exploration software." At the bottom left, there are two white buttons with black text: "Learn more" and "Get Started". On the right side, there is a diagram consisting of vertical lines of varying heights, with small circles at the top of each line. Three larger circles are highlighted in yellow and connected to the diagram. The top-left circle is labeled "to gain knowledge", the top-right circle is labeled "Adaptive design of experiments", and the bottom-right circle is labeled "on your model dynamics".

→ 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



Home

Welcome to chat.openmole.org

Some ideas to get you started

Create channels

Create a public channel that new workspace members can join.

Create Channel

Join rooms

Discover public channels and teams in the workspace directory.

Open directory

Mobile apps

Take Rocket.Chat with you with mobile applications.

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

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 Raimbault

Contribution

The screenshot shows the GitHub repository page for `openmole / openmole-market`. The repository is public and has 14 branches and 0 tags. The main branch is `dev`. The repository description is "OpenMOLE marketplace: complete workflow based on real-world solutions". The repository has 9 stars, 7 forks, and 1 watching. The repository is a report repository. The repository has 305 commits, with the latest commit by `romainreullon` on Apr 7, 2020, titled "Update task name". The repository has a table of branches:

Branch	Description	Last Commit
<code>R-hello</code>	Improve R example	3 years ago
<code>abc</code>	Fix some entries	4 months ago
<code>ackley</code>	Fix some entries	4 months ago
<code>ants-extended</code>	Fix some entries	4 months ago
<code>ants</code>	Fix entries	3 years ago
<code>fire</code>	Fix some market entries	3 years ago

The screenshot shows the OpenMOLE web interface. The header is "OpenMOLE" with a logo. The main navigation bar has a "New project" button. Below the navigation bar, there are four options for creating a project: "Empty project", "From your model", "From examples" (highlighted), and "From URL". Below these options, there are three rows of project examples:

Hello World in Python	Python
Hello World in R	R
Hello World in Scilab	Scilab

Ajouter des exemples thématiques et accessibles divers au market
<https://github.com/openmole/openmole-market>

A banner for the eX Modelo Workshop. The background is a cityscape at sunset. At the top, a dark navigation bar contains the links: About, Programme, Trainers, Venue, Apply, Contact, Sponsors. The main text is centered and reads: "eX Modelo Workshop" in large white font, "Model Evaluation & Exploration with OpenMOLE" in smaller white font, and "November 13th and 14th, 2023 Paris - France" in yellow font. A yellow "Apply" button is located at the bottom center.

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

trempline

HOME MODELES SAVOIR-FAIRE NOTRE APPROCHE PRODUITS EQUIPE ENTREPRISE

NOTRE ENTREPRISE

<h3>RÉFÉRENCES SCIENTIFIQUES</h3> <p>10+ ans de recherche</p> <p>50+ communications internationales</p> <p>100+ supports modélisateur</p> <p>8 supports de thèse</p>	<h3>COOPERATION AVEC LA RECHERCHE PUBLIQUE</h3> <p>2 consultants en recherche CNRS</p> <p>Participation au développement de la plateforme libre d'exploration de modèles</p> <p>OpenMOLE the model exploration software</p>	<h3>UNE ENTREPRISE ÉTHIQUE</h3> <p>Trempline est une SCIC</p> <ul style="list-style-type: none">- 1 personne = 1 voix- pas de valorisation du capital- 2/3 des bénéfices annuels minimum réinvestis <p>Open-source Notre expertise est à vendre, pas notre logiciel</p>
--	--	--

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 coeur de l'approche par workflow [Passerat-Palmbach et al., 2017].

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



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.

-  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., Dommaget, 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.

-  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.



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.



Raimbault, J. (2017).

An applied knowledge framework to study complex systems.

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



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.

-  Raimbault, J. (2021a).
Modeling the co-evolution of cities and networks.
In *Handbook of cities and networks*, pages 166–193. Edward Elgar Publishing.
-  Raimbault, J. (2021b).
A multiscale model of urban morphogenesis.
arXiv preprint arXiv:2103.17241.
-  Raimbault, J. (2021c).
Strong coupling between scales in a multi-scalar model of urban dynamics.
arXiv preprint arXiv:2101.12725.

 Raimbault, 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.

 Raimbault, J. and Batty, M. (2021).

Estimating public transport congestion in uk urban areas with open transport models.

GIS Research UK (GISRUK).

 Raimbault, 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).



Raimbault, 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



Raimbault, 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.



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.

-  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.

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