



HAL
open science

Projet ICI - Utilisation d'un jumeau numérique pour des simulations épidémiologiques

Maxime Colomb, Quentin Cormier, Carl Graham, Julien Perret, Denis Talay

► To cite this version:

Maxime Colomb, Quentin Cormier, Carl Graham, Julien Perret, Denis Talay. Projet ICI - Utilisation d'un jumeau numérique pour des simulations épidémiologiques. Journée de la recherche de l'IGN 2024, Institut national de l'information géographique et forestière, Mar 2024, Champs sur Marme, France. hal-04654383

HAL Id: hal-04654383

<https://hal.science/hal-04654383>

Submitted on 27 Aug 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

Projet ICI — Utilisation d'un jumeau numérique pour des simulations épidémiologiques

Journée de la recherche de l'IGN 2024

Maxime Colomb ^{1,2,3} Quentin Cormier ^{1,2} Carl Graham ^{1,2} Josselin Garnier ¹ Julien Perret ^{3,4} Denis Talay ^{1, 2}

28 Mars 2024

¹ Centre de Mathématiques Appliquées de l'École polytechnique (CMAP - École Polytechnique)

² Analyse d'interactions stochastiques intelligentes et coopératives (ASCI-INRIA)

³ Laboratoire des Sciences et Technologies de l'Information Géographique (LASTIG-IGN)

⁴ Laboratoire de démographie et d'histoire sociale (LDH-EHESS)

ICI : projet pluri-disciplinaire entre Inria, l'École Polytechnique et l'IGN.

Jumeau numérique territorial d'une grande zone urbaine

couplé avec

un simulateur **épidémiologique** à l'échelle **individuelle**.

Cela nous permet notamment de

- Simuler des **chaînes de contaminations** réalistes
- Quantifier l'impact de nombreuses **politiques sanitaires**
- Mettre à disposition une interface d'exploration des résultats

Architecture **modulaire** à tous les niveaux.

I) Le générateur de jumeaux numériques

Déjà présenté lors des JR 2023

II) Le simulateur de diffusion épidémique

III) L'exploration du modèle et de ses résultats



```
https://invidious.  
privacydev.net/  
watch?v=  
t8DvbTOHv7U
```

Jumeau numérique

Jumeau numérique d'un territoire

Modélisation **très fine** du territoire à l'échelle des lieux de vie et de travail.

Lieux contenus dans les bâtiments :

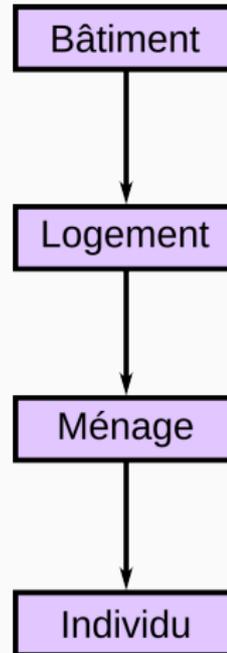
- Lieux de travail
- Points d'intérêt (POI)
- Logements



Population synthétique quadri-couche

Un générateur original

- Fortement **géolocalisé**
- De **nombreux attributs descriptifs** des individus et de leurs ménages
- Configurations **hiérarchisées** et conformes aux données socio-démographiques disponibles



Flux et déplacements de population

Flux extérieurs

- Flux pendulaires
- Flux occasionnels

Agendas individuels

Définis pour chaque :

- Classe d'âge
- Occupation
- Statut socio-professionnel
- Zone d'habitat
- Jour de la semaine

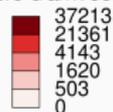
Flux entrant des Vème-VIème-VIIème arrondissements - arrivée à 9h



Flux de départs

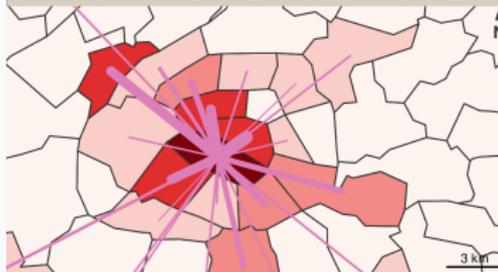


Nombre d'arrivées

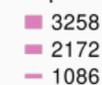


Données issues de l'Étude Globale Transport

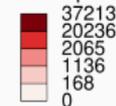
Flux sortant des Vème-VIème-VIIème arrondissements - arrivée à 9h



Flux de départs



Nombre de départs



Simulation épidémiologique

Simulation **probabiliste** à l'échelle individuelle.

Déplacement des *individus* en fonction de leurs *agendas* dans les *lieux* du jumeau numérique.

Probabilité de contamination lors de la **présence simultanée** d'individus dans un **même lieu**.

Réplication par méthode de **Monte Carlo** pour l'**étude statistique** de la propagation épidémique.

Probabilité de contamination inter-individus

Probabilité de contamination actuelle :

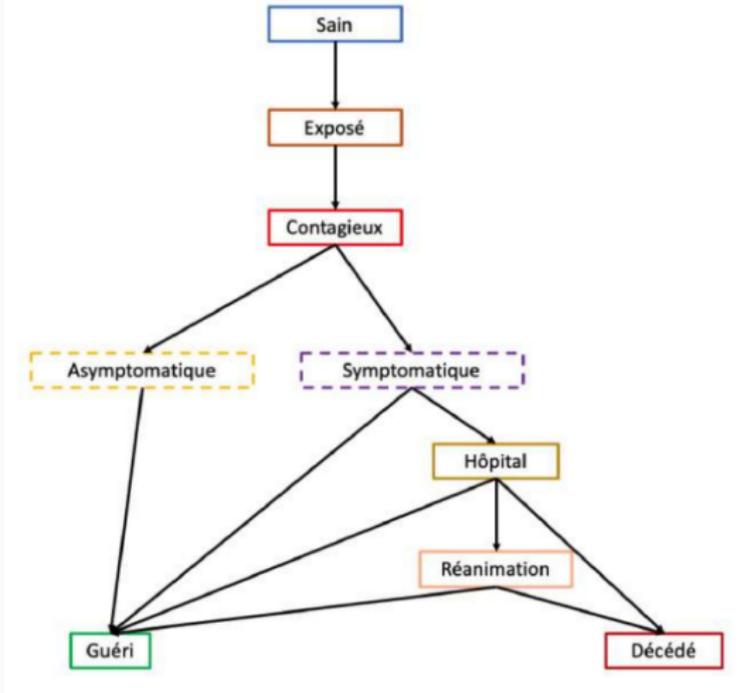
$$1 - \left(1 - \frac{\text{transmission_factour}}{(\text{distance}/\text{distance}_{\text{type}})^2} \right)^{\text{duration}/\text{duration}_{\text{type}}}$$

Dépendant de :

- *Contact duration and distance between individuals*
- *Coefficients for calibration, depending on the type of place where individuals meet*

Hoertel, N., Blachier, M., Blanco, C., Olfson, M., Massetti, M., Rico, M. S., Limosin, F. & Leleu, H. (2020). A stochastic agent-based model of the SARS-CoV-2 epidemic in France. *Nature medicine*.

Les statuts épidémiologiques



Durées et probabilités de passages entre les états **dépendantes** des **caractéristiques** des individus.

Grâce à la **très fine échelle** du jumeau numérique, nous pouvons implémenter de **nombreuses politiques sanitaires** ciblées et précises :

- Protocoles sanitaires pour les écoles
- Confinements
- Campagnes de vaccination

Grâce à la **très fine échelle** du jumeau numérique, nous pouvons implémenter de **nombreuses politiques sanitaires** ciblées et précises :

- **Protocoles sanitaires pour les écoles**
- Confinements
- Campagnes de vaccination

Fermeture ciblée de classes :

- Quand le nombre d'élèves malades est supérieur à un seuil

Grâce à la **très fine échelle** du jumeau numérique, nous pouvons implémenter de **nombreuses politiques sanitaires** ciblées et précises :

- **Protocoles sanitaires pour les écoles**
- Confinements
- Campagnes de vaccination

Fermeture des écoles :

- Quand le taux d'incidence global est supérieur à un seuil

Développé et optimisé dans le langage [Julia](#).

Statistiques d'exécution :

Arrondissement Parisien	Individus résidents	Individus au sein de la zone	Durée d'exécution d'une simulation de 100 jours
3ème	34 119	1 283 845	125 sec
15ème	226 913	2 591 227	293 sec
20ème	186 904	1 269 025	147 sec

Sur un ordinateur portable 16Go de RAM - CPU 1.70GHz×4

Exploration du modèle



Plateforme d'exploration de modèles.

Tutoriel à 16h45

Exécutions systématiques de simulation permettant :

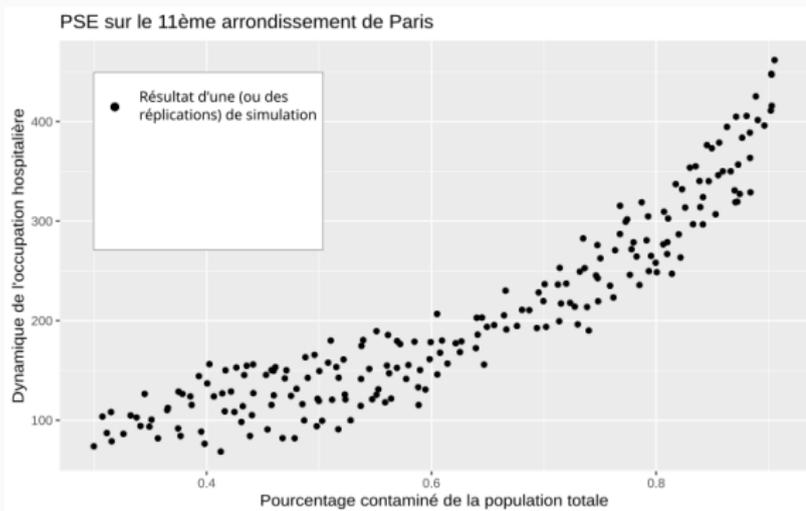
1. d'explorer le modèle et ses paramètres
2. d'optimiser les interventions sanitaires

Exécutions sur le cluster *Margaret* d'Inria et *IRENE-ROME* du CEA

Reuillon, R., Leclaire, M. & Rey-Coyrehourcq, S. (2013). OpenMOLE, a workflow engine specifically tailored for the distributed exploration of simulation models, *Future Generation Computer Systems*.

Variation des paramètres de la **loi de contamination** pour trouver les simulations les plus **variées**, selon :

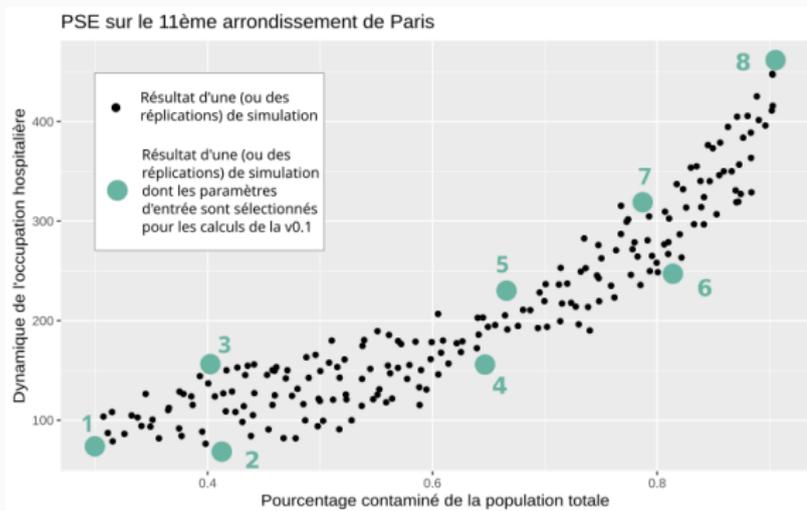
- Le nombre total de contaminations
- La dynamique d'occupation hospitalière



Variation des paramètres de la **loi de contamination** pour trouver les simulations les plus **variées**, selon :

- Le nombre total de contaminations
- La dynamique d'occupation hospitalière

Présélection de différentes formes d'épidémies :



Optimisation :

- **durée** de la mesure
- **seuil d'application** de la mesure

Critères d'optimisation :

- **somme** totale des **contaminations**
- nombre total de **jours manqués pour les élèves**



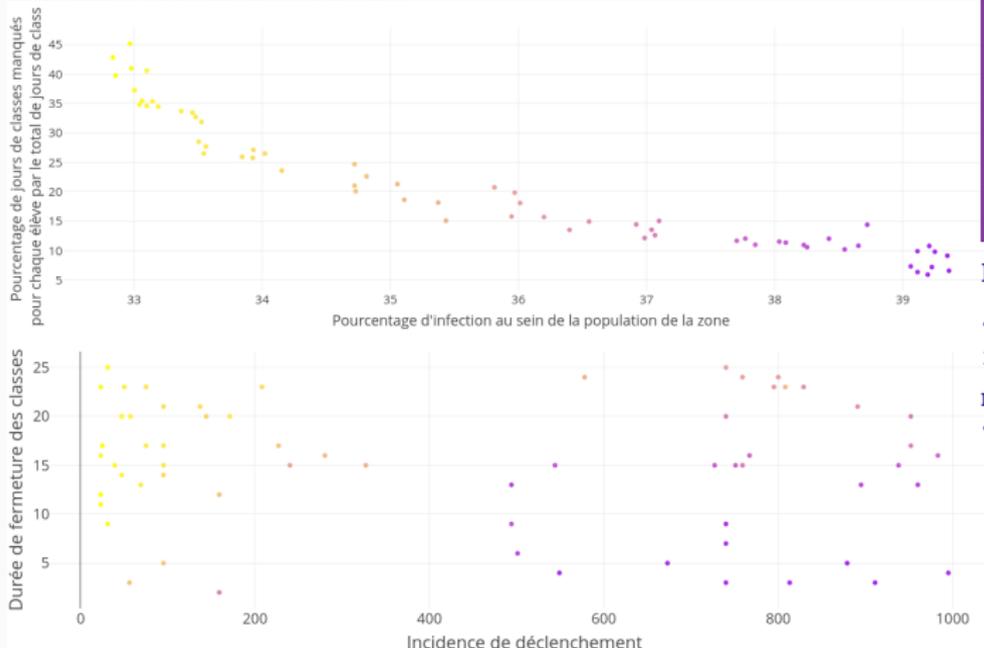
`https://ici.saclay.inria.fr/shiny/multicriterionoptim\schoollockdown/`

Optimisation de contraintes sanitaires

Fermeture générale des écoles

Paramétrage de la loi N°3

11ème arrondissement



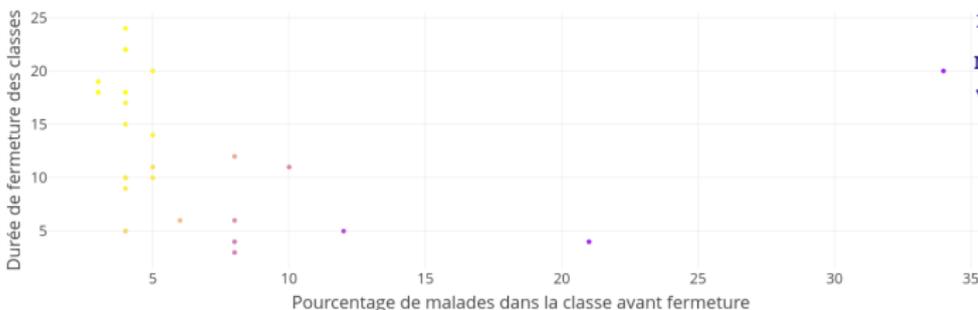
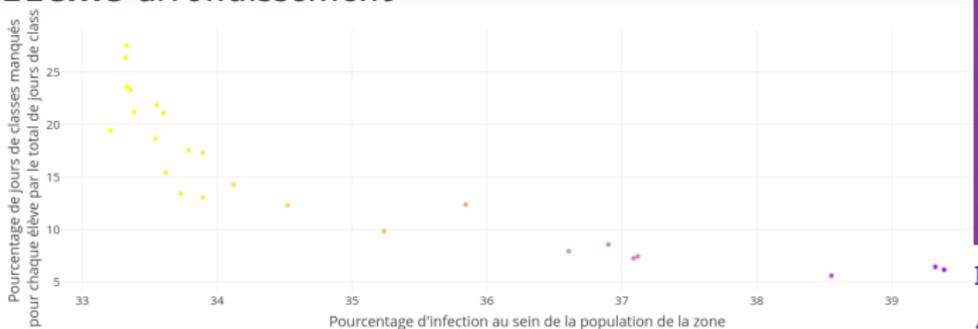
<https://ici.saclay.inria.fr/shiny/multicriterionoptim/schoollockdown/>

Optimisation de contraintes sanitaires

Fermeture individualisée de classes

Paramétrage de la loi N°3

11ème arrondissement

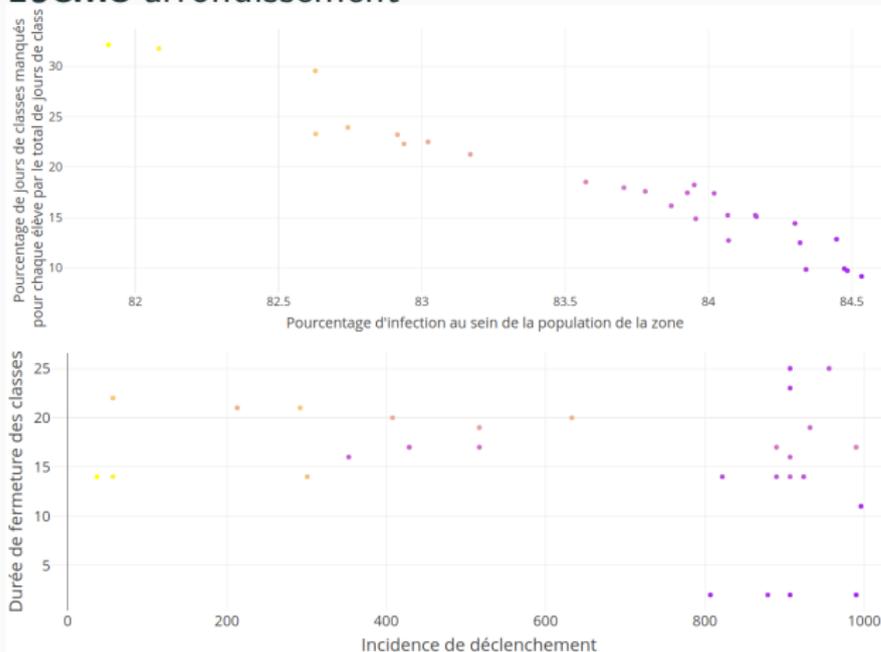


<https://ici.saclay.inria.fr/shiny/multicriterionoptim/schoollockdown/>

Fermeture générale des écoles

Paramétrage de la loi N°6

19ème arrondissement

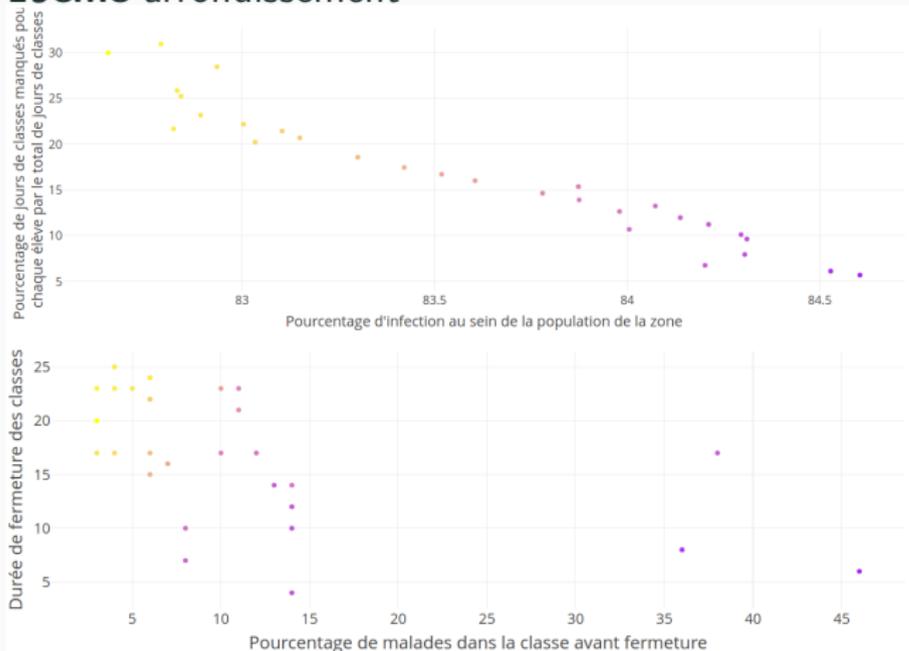


<https://ici.saclay.inria.fr/shiny/multicriterionoptim/schoollockdown/>

Fermeture individualisée de classes

Paramétrage de la loi N°6

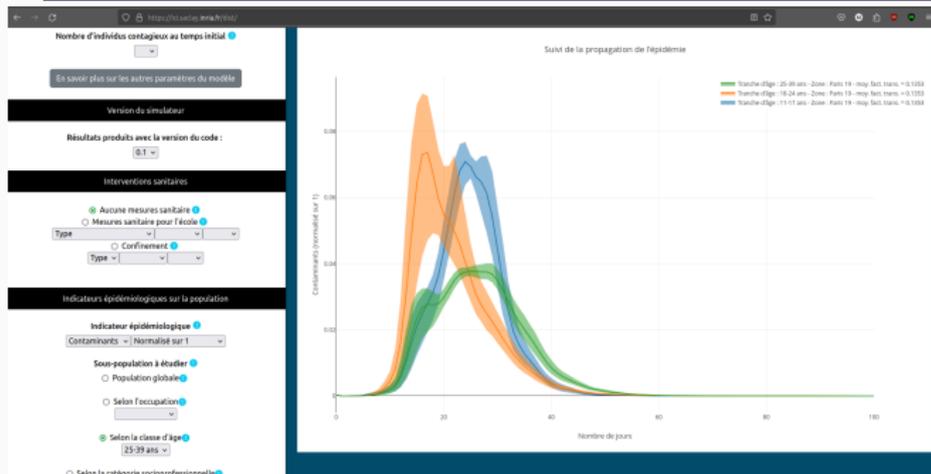
19ème arrondissement



<https://ici.saclay.inria.fr/shiny/multicriterionoptim/schoollockdown/>

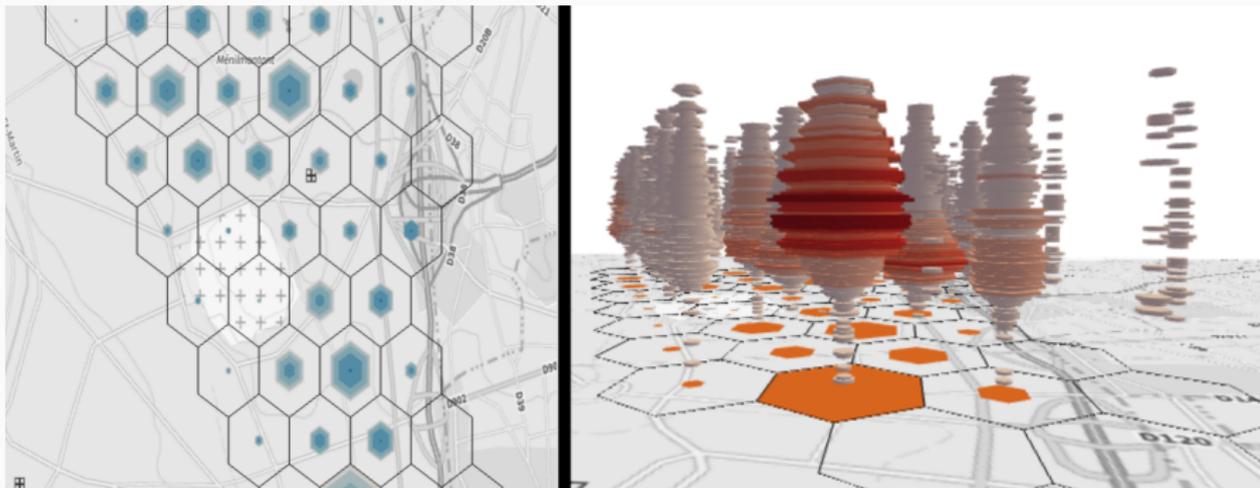
Visualisation des résultats

ICI



<https://ici.saclay.inria.fr/dist/>

Partenariat avec l'équipe LASTIG-Geovis pour des visualisations avancées de diffusion épidémiologique.



intégration prochaine sur l'appli web

Gautier, J., Lobo, M. J., Fau, B., Drugeon, A., Christophe, S., & Touya, G. (2021). COVID-19 geoviz for spatio-temporal structures detection. In *Proceedings of the ICA*.

Conclusions et perspectives

Couplage d'un **jumeau numérique** avec un **simulateur épidémiologique**

Influence des **spécificités** géographiques et des dynamiques de contamination

Fort potentiel opérationnel

Contribution à l'**épidémiologie d'intervention** et à la validation de politiques sanitaires ciblées

- Intégration de **comportements différenciés** selon les règles sanitaires et modélisation des mobilités (PEPR MOBIDEC).
- Collaboration avec l'INSERM sur l'application du modèle dans le cadre de l'épidémiologie d'intervention.
- Insertion de certains modules dans un catalogue de **jumeaux numériques** nationaux et souverains.

Merci de votre attention !

<https://ici.saclay.inria.fr>

