

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

Journée de la recherche de l'IGN 2024

Maxime Colomb

28 Mars 2024

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

[https://invidious.
privacydev.net/
watch?v=
t8DvbTOHv7U](https://invidious.privacydev.net/watch?v=t8DvbTOHv7U)

III) L'exploration du modèle et de ses résultats

Jumeau numérique

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

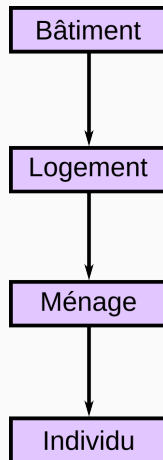
Lieux contenus dans les bâtiments :

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



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 extérieurs

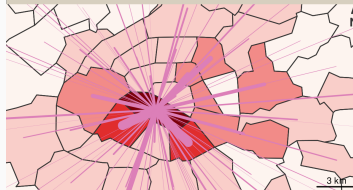
- Flux pendulaires
- Flux occasionnels

Agendas individuels

Définis pour chaque :

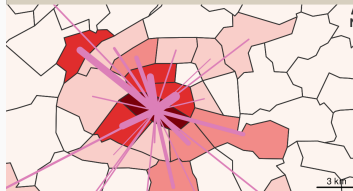
- Classe d'âge
- Occupation
- Statut socio-professionnel
- Zone d'habitat
- Jour de la semaine

Flux entrant des Vème-Vlème-Vllème arrondissements - arrivée à 9h



Données issues de l'Étude Globale Transport

Flux sortant des Vème-Vlème-Vllème arrondissements - arrivée à 9h



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 :

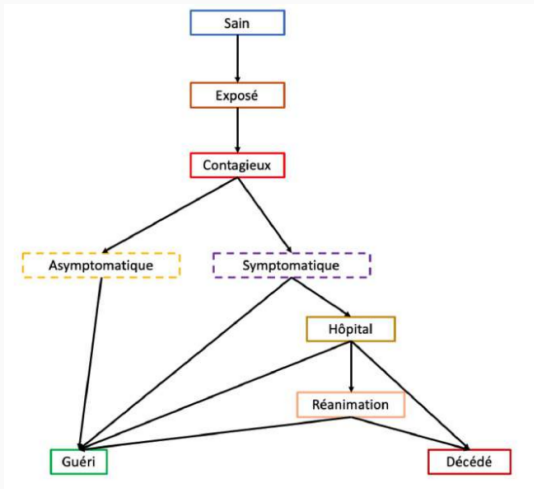
$$1 - \left(1 - \frac{\text{facteur}_{\text{transmission}}}{(\text{distance}/\text{distance}_{\text{type}})^2} \right)^{\text{durée}/\text{durée}_{\text{type}}}$$

Dépendant de :

- *Durée de contact et distance entre les individus*
- *Coefficients à calibrer dépendants du lieu de rencontre et des individus*

Hoertel, N., Blachier, M., Blanco, C., Olsson, 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 :

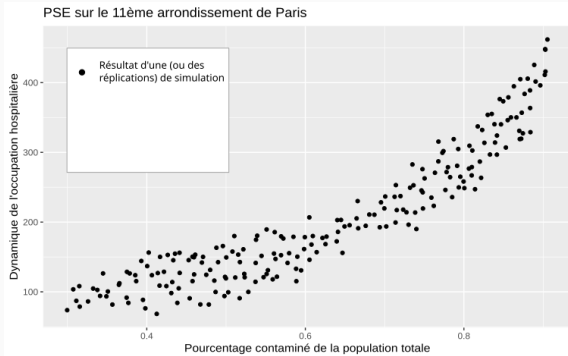
1. d'explorer le modèle et ses paramètres
2. d'optimiser les interventions sanitaires

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 :

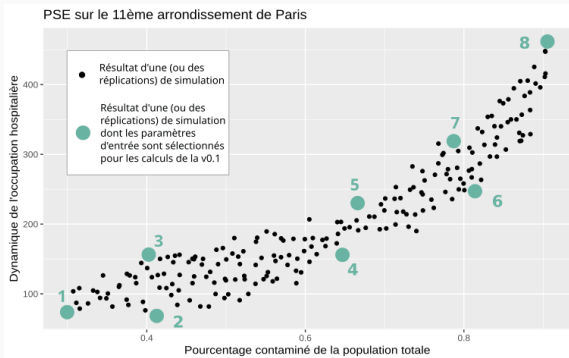
- Le nombre total de contaminations
- La dynamique d'occupation hospitalière



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**

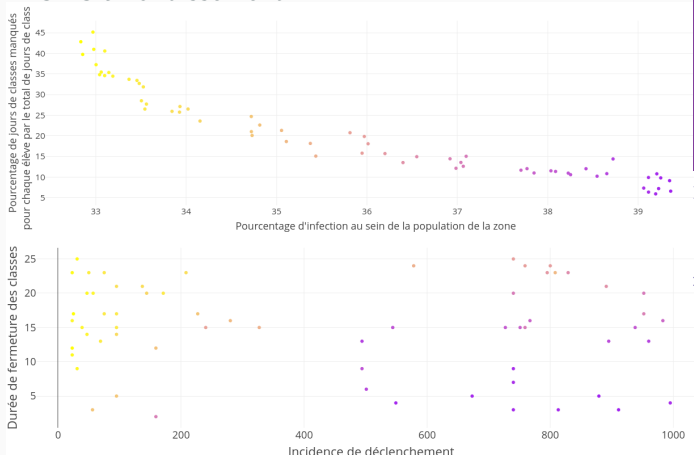


<https://ici.saclay.inria.fr/shiny/multicriterionoptim/schoollockdown/>

Fermeture **générale** des écoles

Paramétrage de la loi N°3

11ème arrondissement

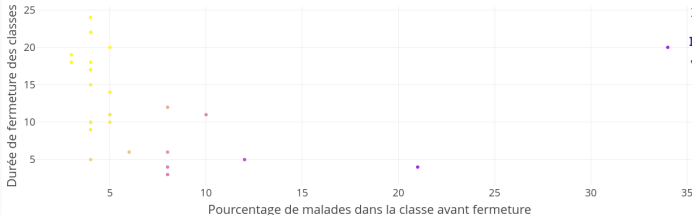
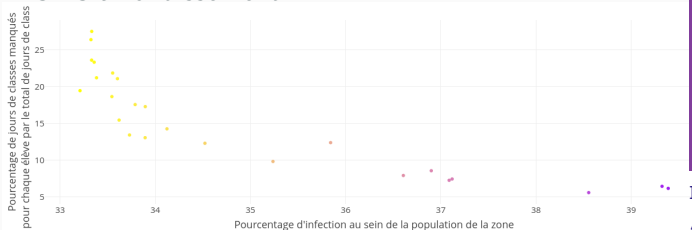


<https://ici.saclay.inria.fr/shiny/multicriterionoptim/schoollockdown/>

Fermeture individualisée de classes

Paramétrage de la loi N°3

11ème arrondissement

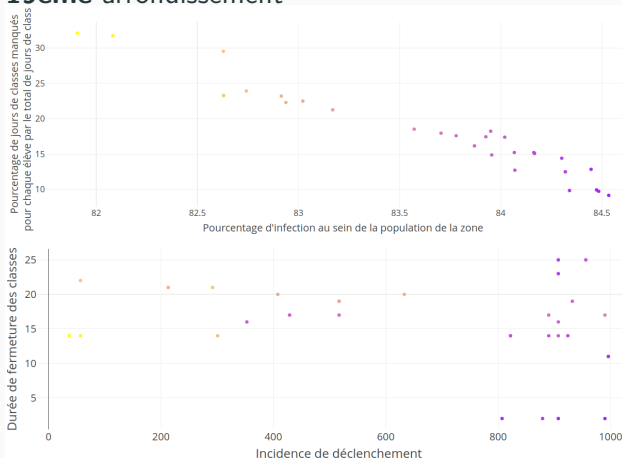


<https://ici.saclay.inria.fr/shiny/multicriterionoptim/schoollockdown/>

Fermeture **générale** des écoles

Paramétrage de la loi N°6

19ème arrondissement

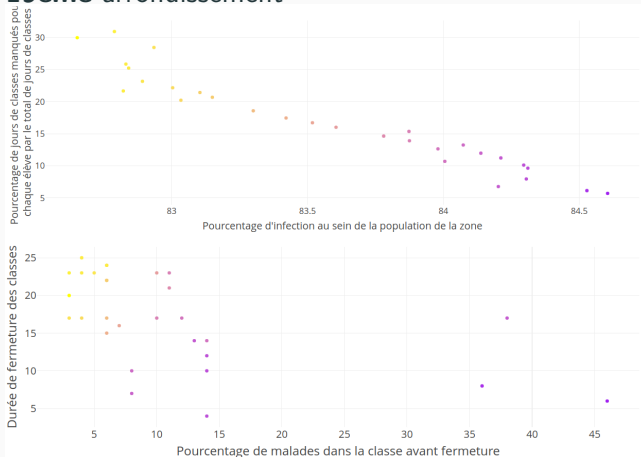


<https://ici.saclay.inria.fr/shiny/multicriterionoptim/\schoollockdown/>

Fermeture **individualisée** de **classes**

Paramétrage de la loi N°6

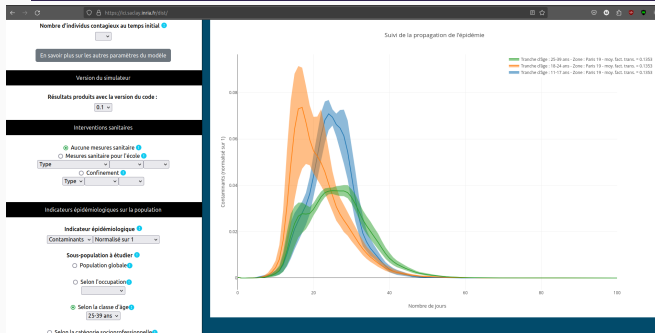
19ème arrondissement



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

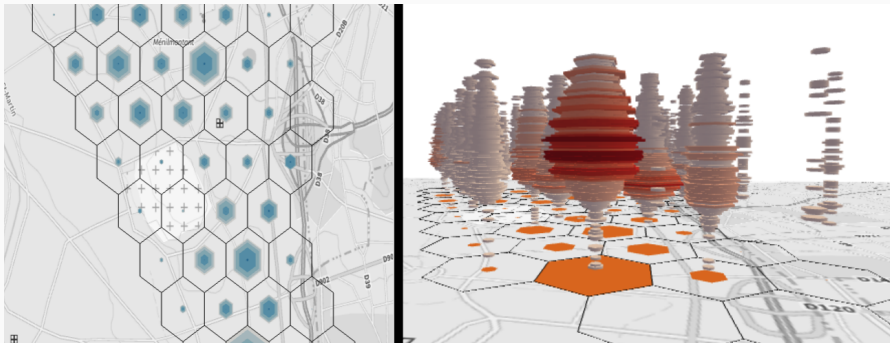
Visualisation des résultats

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>

