

ICI



IGN
INSTITUT NATIONAL
DE L'INFORMATION
GÉOGRAPHIQUE
ET FORESTIÈRE



Simulation de la propagation de l'épidémie de COVID-19 au sein d'une population réaliste

Denis TALAY, Maxime COLOMB, Nicolas GILET et l'équipe ICI

Séminaire FDD-FiME - 17 juin 2022

Projet ICI (INRIA – Contributions – IGN)



Objectif principal du projet ICI :

« Développer un simulateur ayant pour but d'aider les autorités sanitaires à prendre les meilleures décisions, à l'échelle d'une ville moyenne, pour contrôler au mieux la propagation de l'épidémie. »

Objectif principal du projet ICI :

« Développer un simulateur ayant pour but d'**aider les autorités sanitaires à prendre les meilleures décisions**, à l'échelle d'une ville moyenne, pour contrôler au mieux la propagation de l'épidémie. »



Développement d'une interface utilisateur *grand public*



Développement d'un modèle de présence d'individus



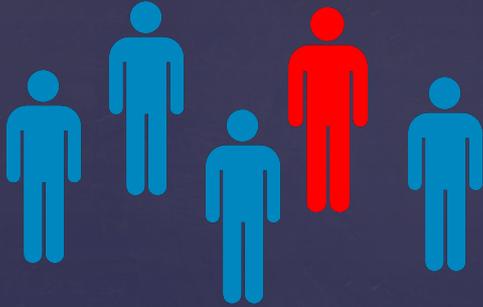
Développement d'un simulateur de propagation d'épidémies

Sommaire

1. *Un modèle de présence d'individus...*
2. *... pour prédire les vagues épidémiques ...*
3. *... à l'aide du HPC ...*
4. *... pour aider les autorités sanitaires ...*
5. *... et peut être appliqué à d'autres problématiques !*

1. Un modèle de présence d'individus...

Trois ingrédients essentiels :



Une population synthétique...



... avec un agenda...



...au sein d'une géographie urbaine.

1. *Un modèle de présence d'individus...*

Trois ingrédients essentiels :



*...au sein d'une géographie
urbaine.*

1. Un modèle de présence d'individus...

Une géographie urbaine réaliste

Composition des POI

légende : *nombre d'entrées dans la nomenclature* *position géographique* *Indice de taille*

Commerces recensés par la municipalité Parisienne



218 types d'établissement
Classe de surface de l'établissement
Centre commercial
Entrée des établissement contrôlée manuellement

Activité déclarée



368 types d'établissement
Tranche d'effectif



732 types d'établissement
Tranche d'effectif

Géocodage

Objets géographiques saisis collaborativement



176 catégories (sur le V^{ème})
Capacité (rare) Horaires
Entrée des établissement contrôlée manuellement

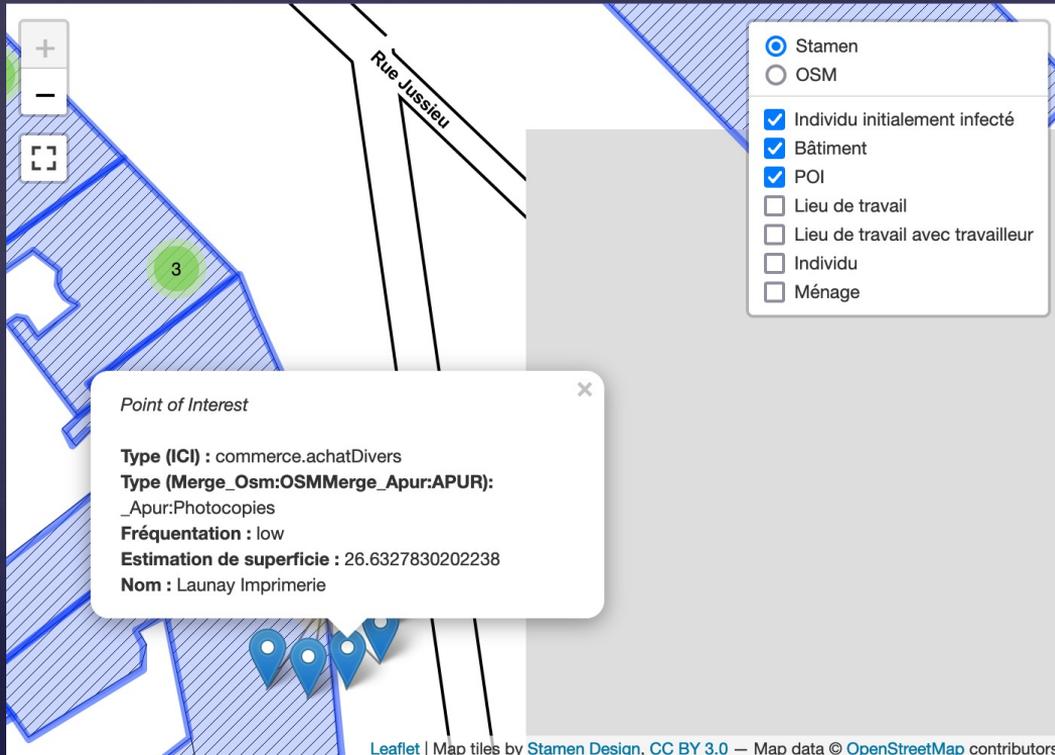
Base de données des activités



158 types d'établissement
Pas de mesure de taille
Géocodage par l'INSEE

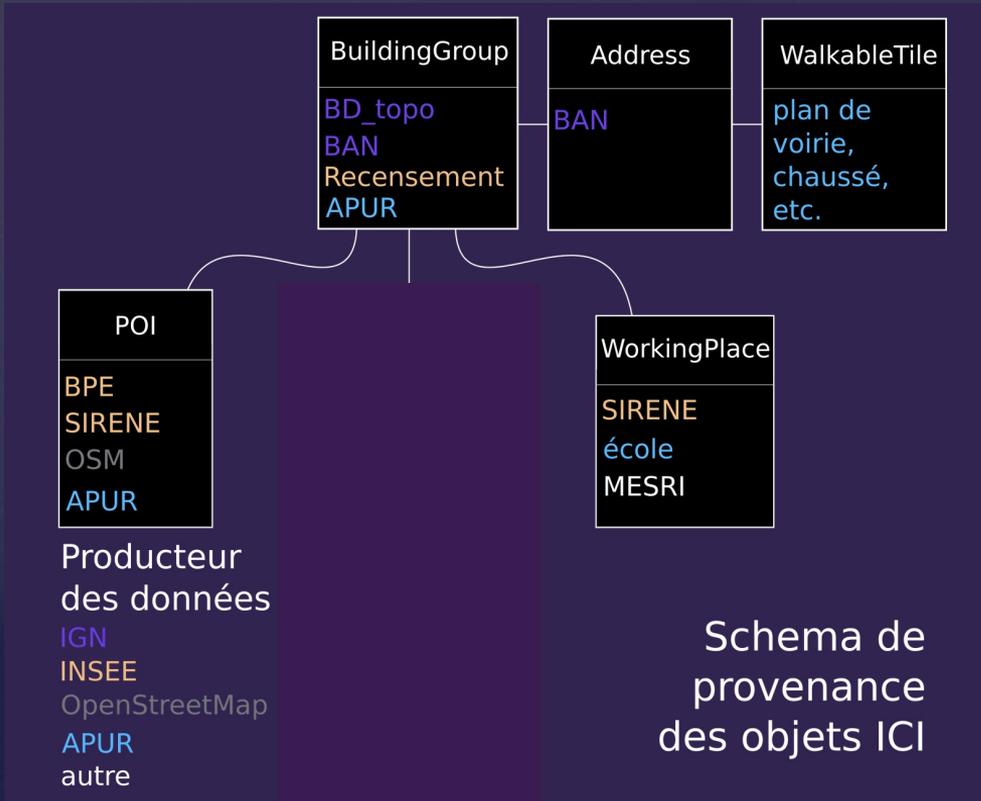
1. Un modèle de présence d'individus...

Une géographie urbaine réaliste



1. Un modèle de présence d'individus...

Une géographie urbaine réaliste

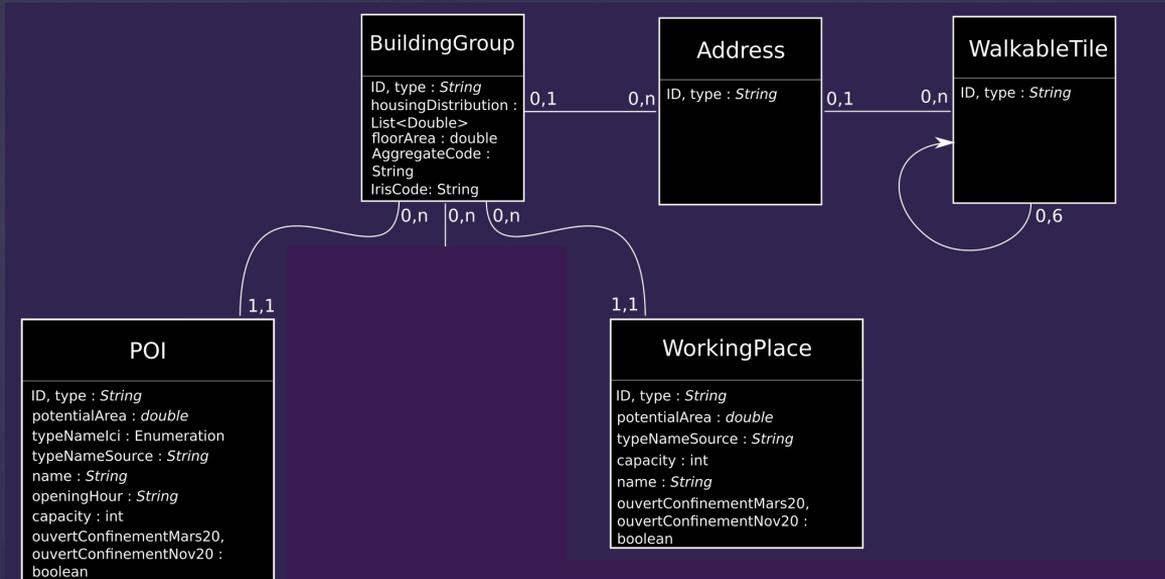


Construite à partir de nombreuses sources de données :

- IGN
- INSEE
- OpenStreetMap
- Agence Parisienne d'Urbanisme
- Ministères

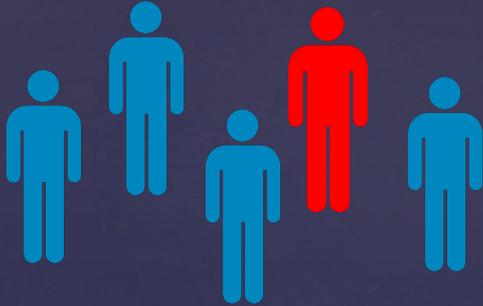
1. Un modèle de présence d'individus...

Une géographie urbaine réaliste



1. Un modèle de présence d'individus...

Trois ingrédients essentiels :



Une population synthétique...



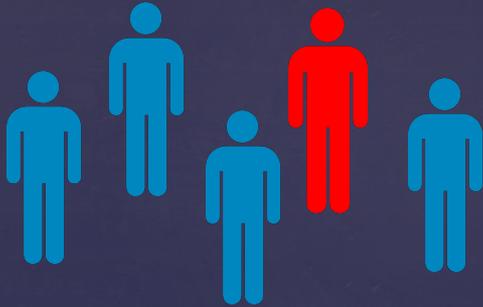
... avec un agenda...



...au sein d'une géographie urbaine.

1. *Un modèle de présence d'individus...*

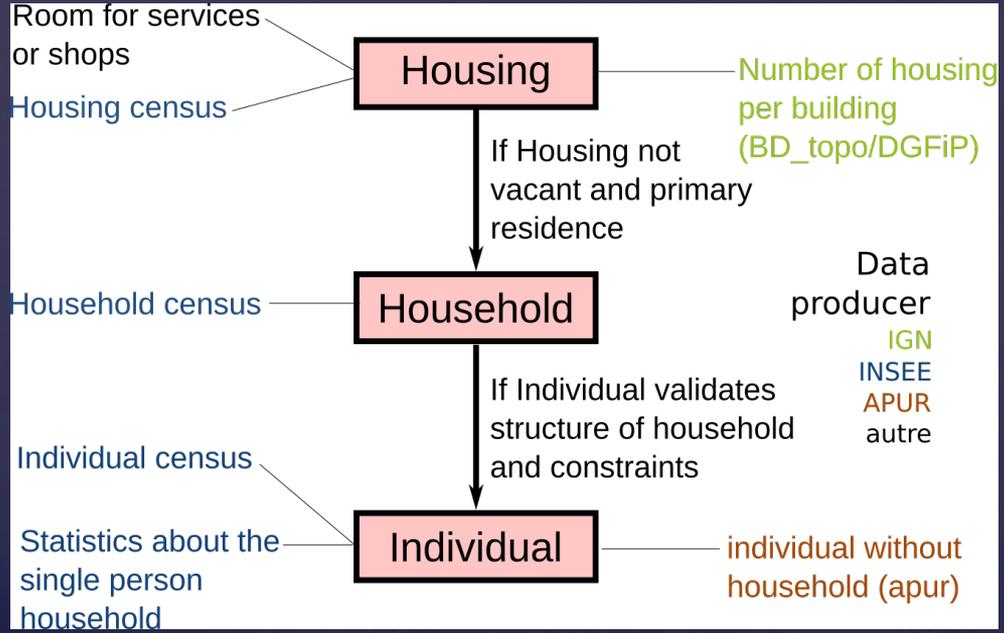
Trois ingrédients essentiels :



*Une population
synthétique...*

1. Un modèle de présence d'individus...

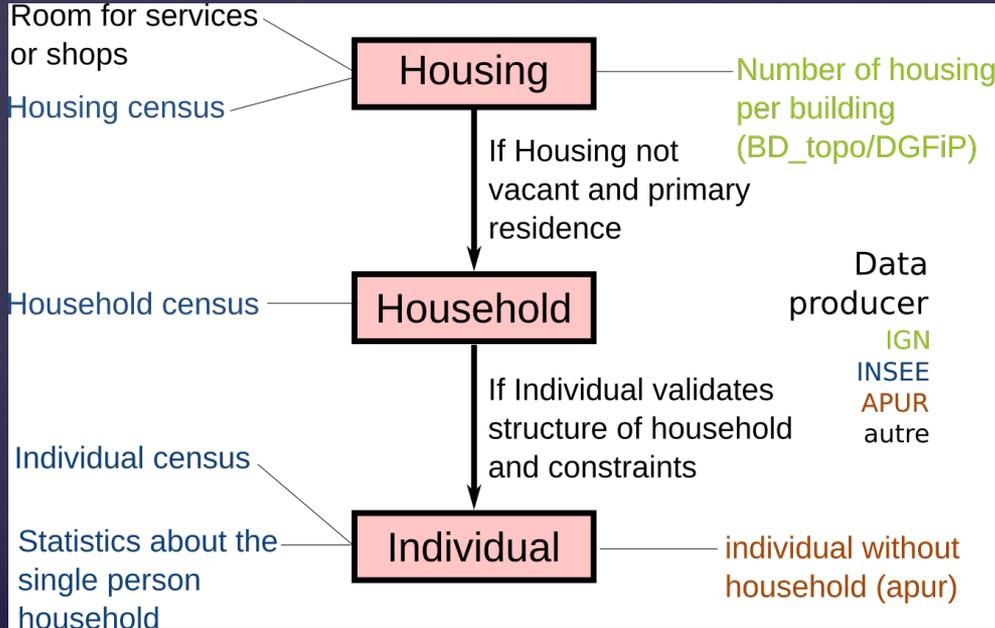
Une population synthétique



Construite à l'aide d'une méthode originale générant successivement les logements, les ménages puis les individus [Colomb et al., in prep.]

1. Un modèle de présence d'individus...

Une population synthétique



Contraintes d'intégrités pour les logements dans les bâtiments :

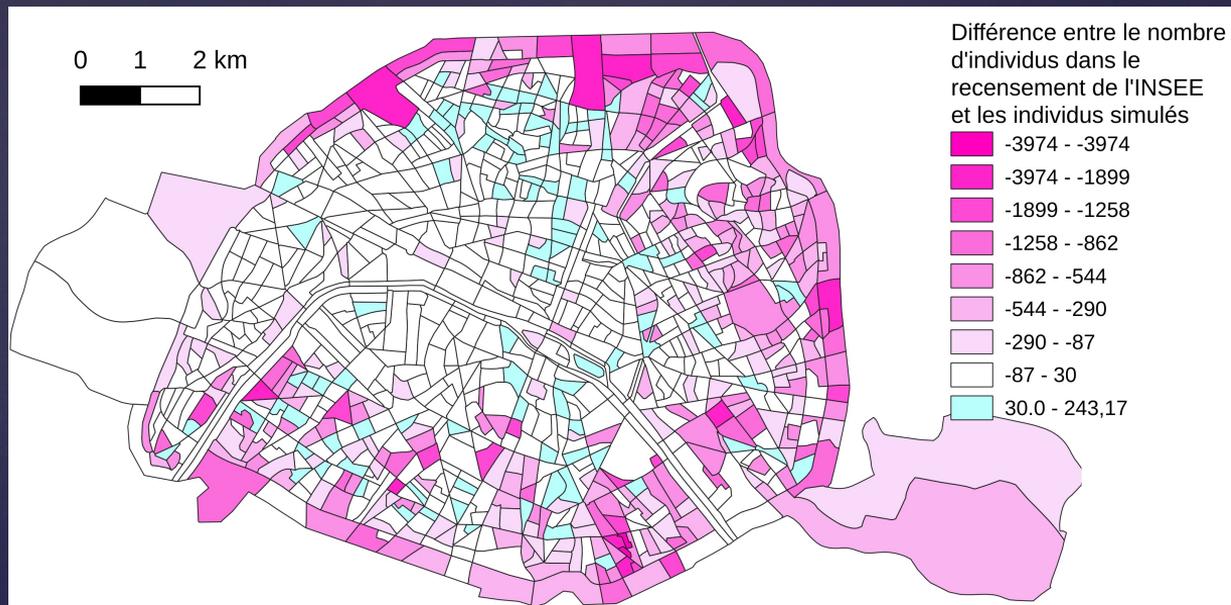
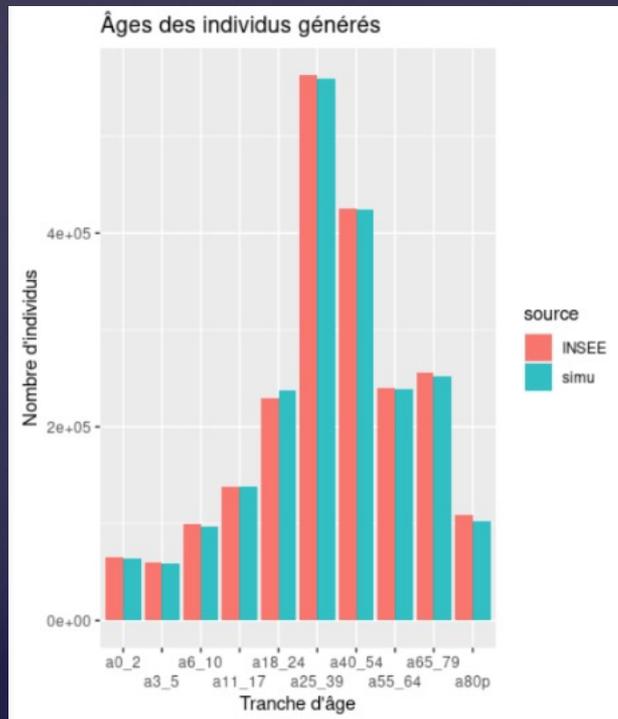
- surface nécessaire

Contraintes d'intégrités pour les individus dans les ménages :

- âges parents/enfants
- sexe des personnes d'un couple
- âges des personnes seules

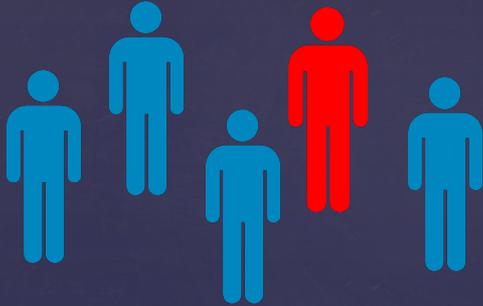
1. Un modèle de présence d'individus...

Une population synthétique



1. Un modèle de présence d'individus...

Trois ingrédients essentiels :



Une population synthétique...



... avec un agenda...



...au sein d'une géographie urbaine.

1. Un modèle de présence d'individus...

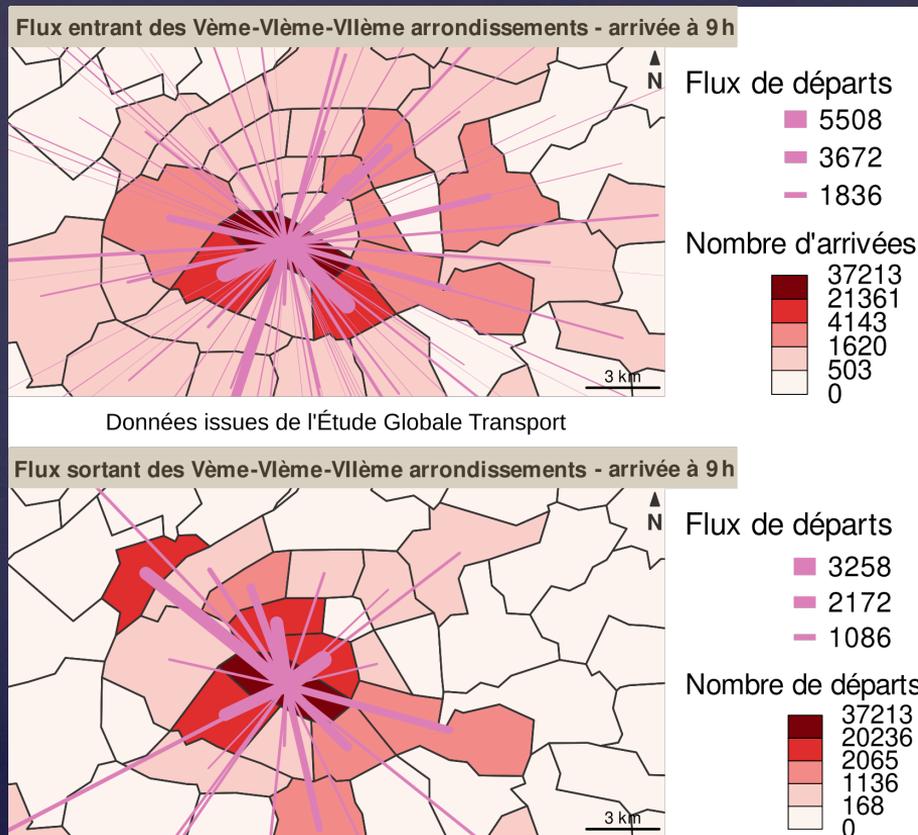
Trois ingrédients essentiels :



... avec un agenda...

1. Un modèle de présence d'individus...

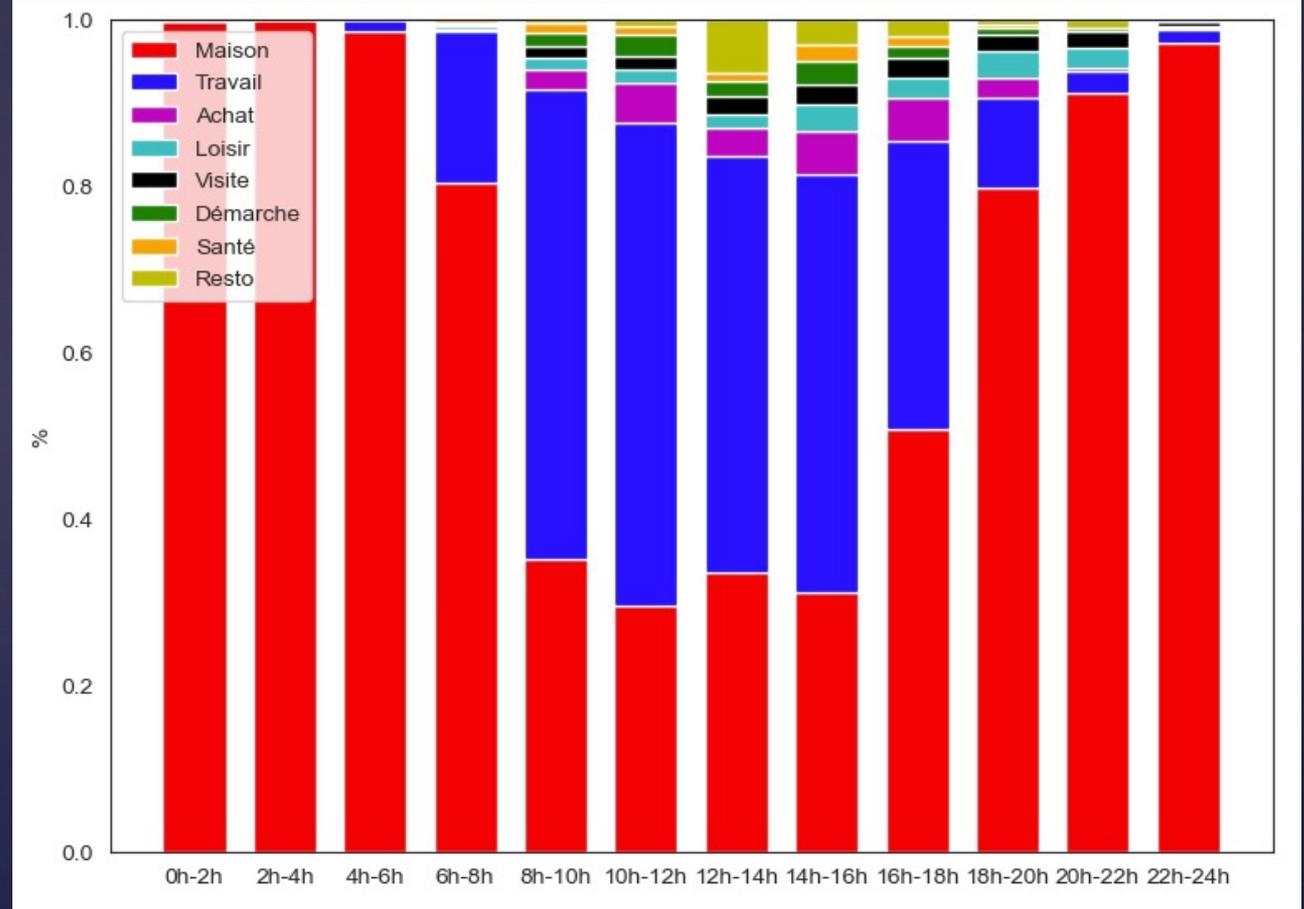
Création d'un agenda réaliste



Modélisation des flux réalisées à l'aide de l'enquête globale de transport (EGT) sur l'habitude des déplacements des franciliens.

1. Un modèle de présence d'individus...

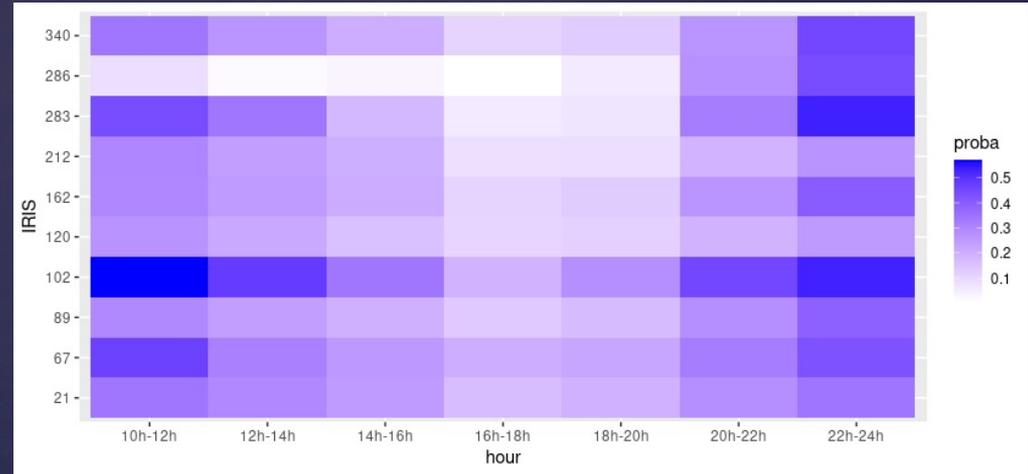
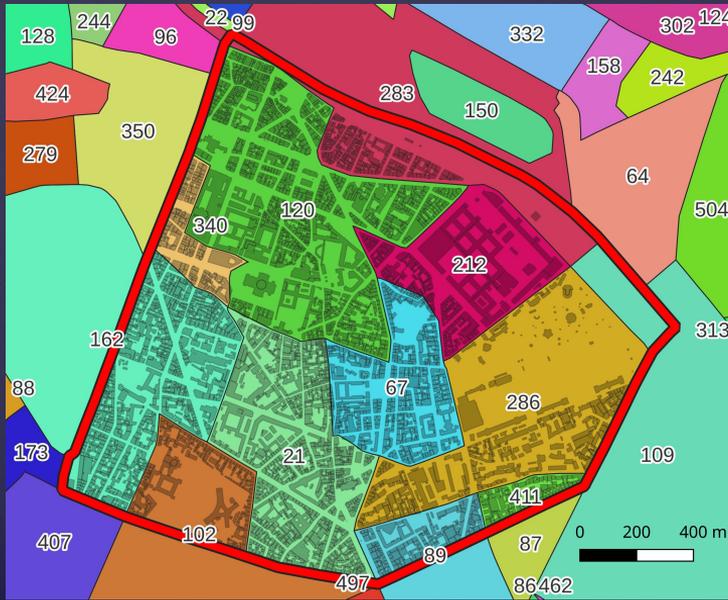
Proportion des tâches
suivant des créneaux
horaires de 2h



1. Un modèle de présence d'individus...

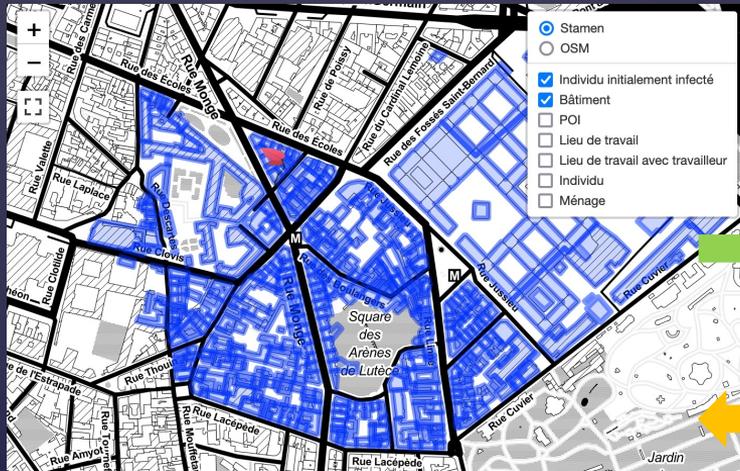
Création d'un agenda réaliste

- Localisation des destinations grâce aux flux de données mobiles (*en cours d'intégration*)



1. Un modèle de présence d'individus...

Gestion des flux entrant et sortant (*travaux préliminaires*) :



Individus ne sortant pas du quartier

Individus sortant travailler/faire des achats

Individus venant travailler/faire des achats + touristes

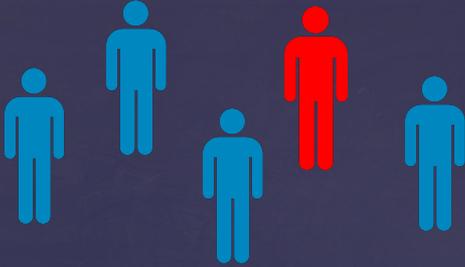
1. *Un modèle de présence d'individus...*

Gestion des flux entrant et sortant (*travaux préliminaires*) :

- Prise en compte des validations des tickets de transports (RATP)
- Utilisation des données mobiles

1. Un modèle de présence d'individus...

Trois ingrédients essentiels :



Une population synthétique...



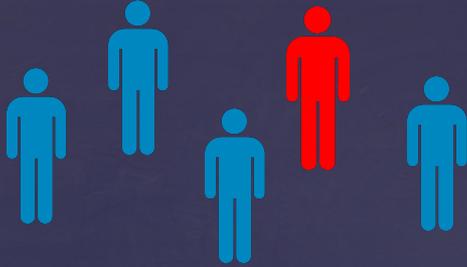
... avec un agenda...



...au sein d'une géographie urbaine, dans laquelle...

2. ... pour prédire les vagues épidémiques...

Trois ingrédients essentiels + 1 !



Une population synthétique...



... avec un agenda...



...au sein d'une géographie urbaine, dans laquelle...



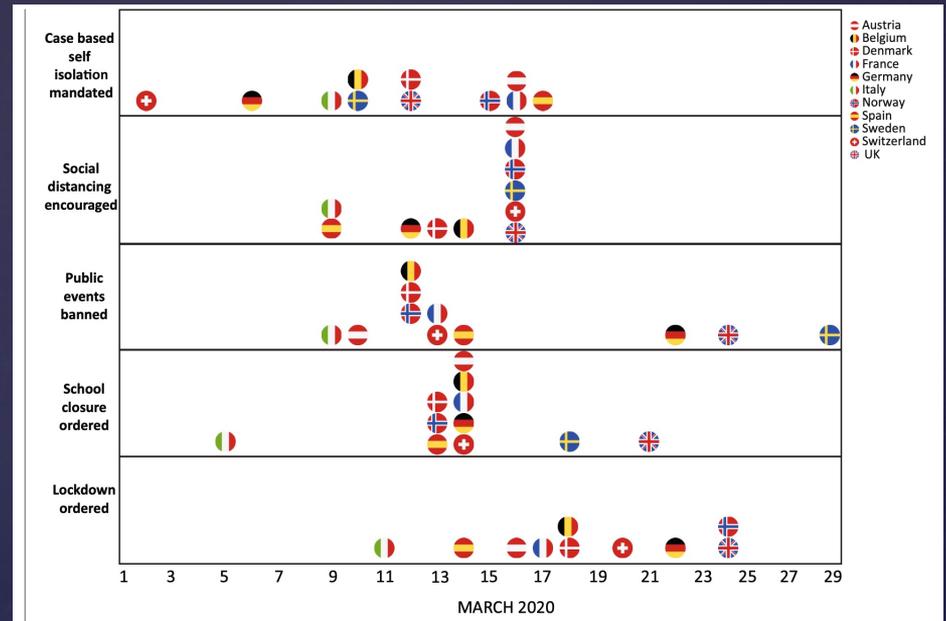
...un virus se propage

2. ... pour prédire les vagues épidémiques...

Modélisation mathématique **déterminante** pour fournir des informations cruciales :

- Mécanismes de transmission
- Prédiction des vagues épidémiques
- Impact des différentes interventions

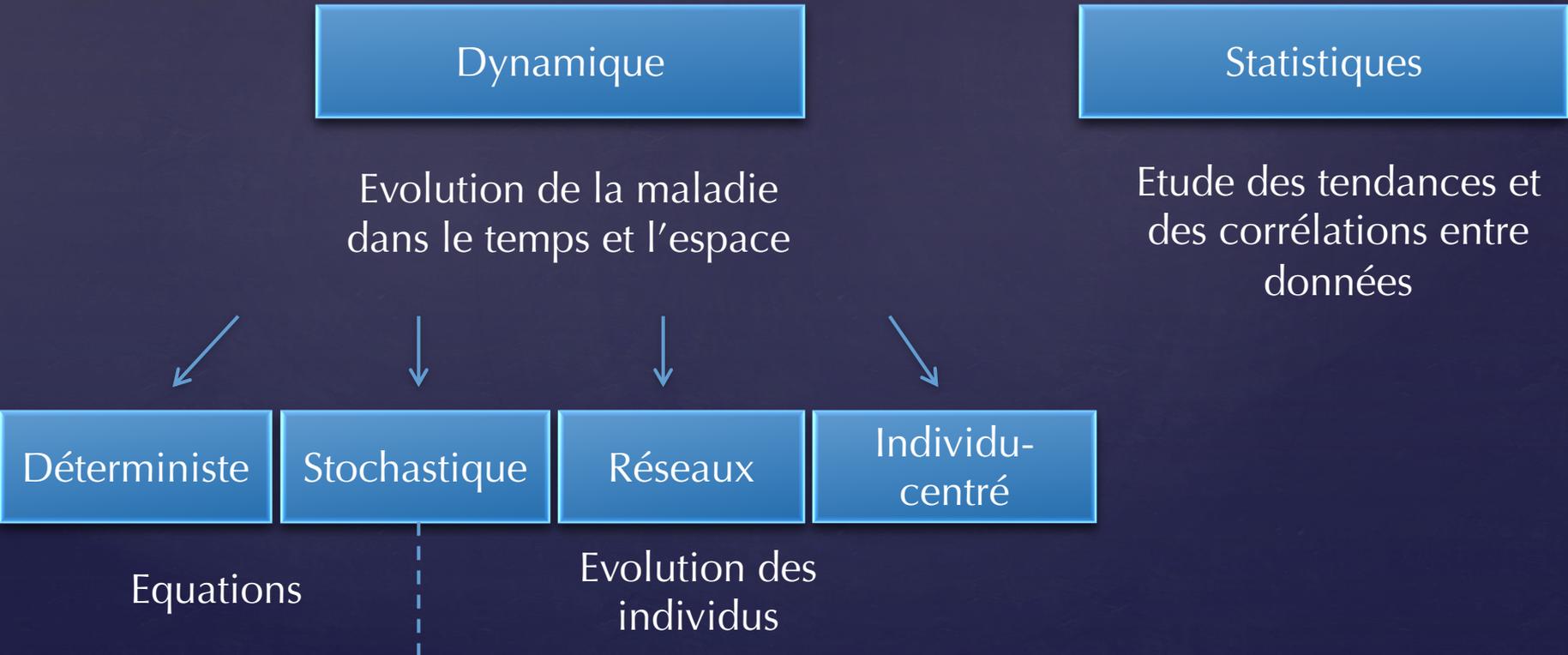
Contribution au développement de la politique de santé publique depuis l'émergence du COVID-19 en Chine



Aperçu des stratégies d'interventions de 11 pays européens [Flaxman et al., 2020]

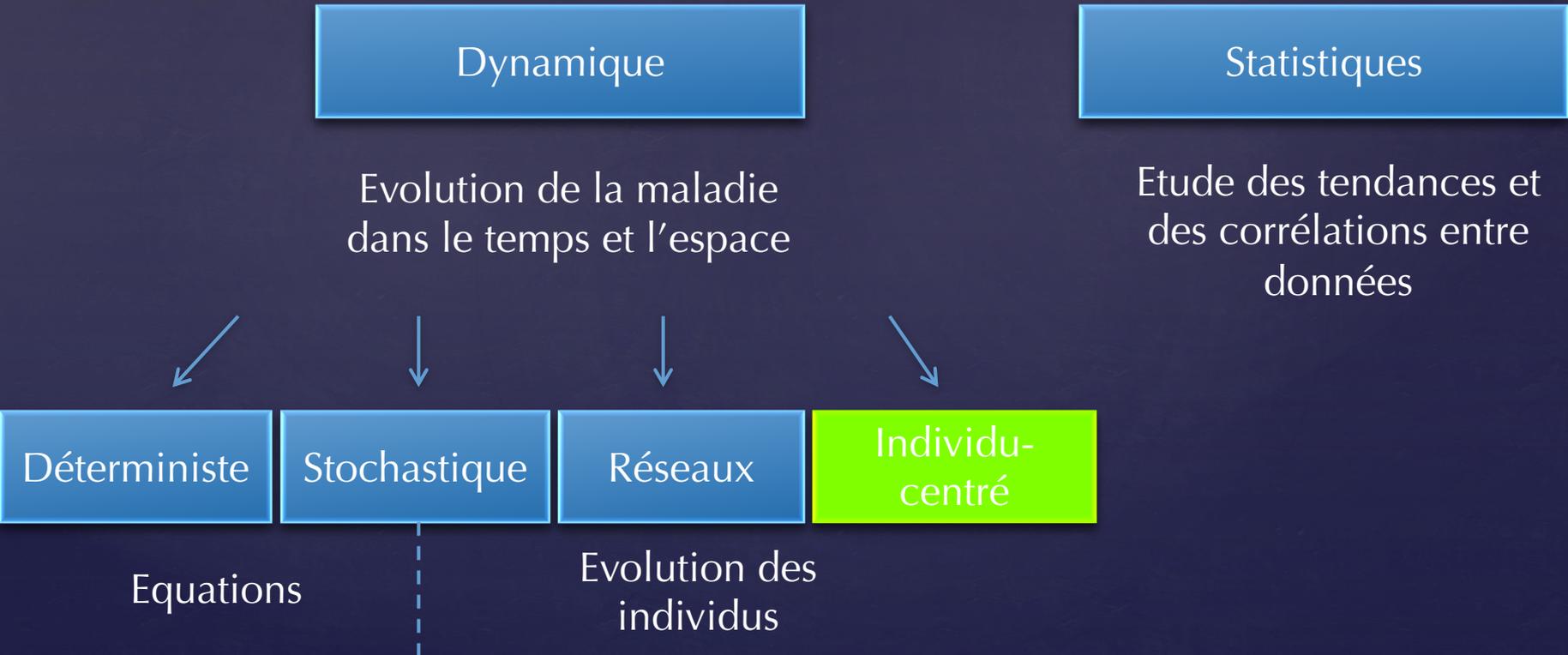
2. ... pour prédire les vagues épidémiques...

Différents types de modèles mathématiques :



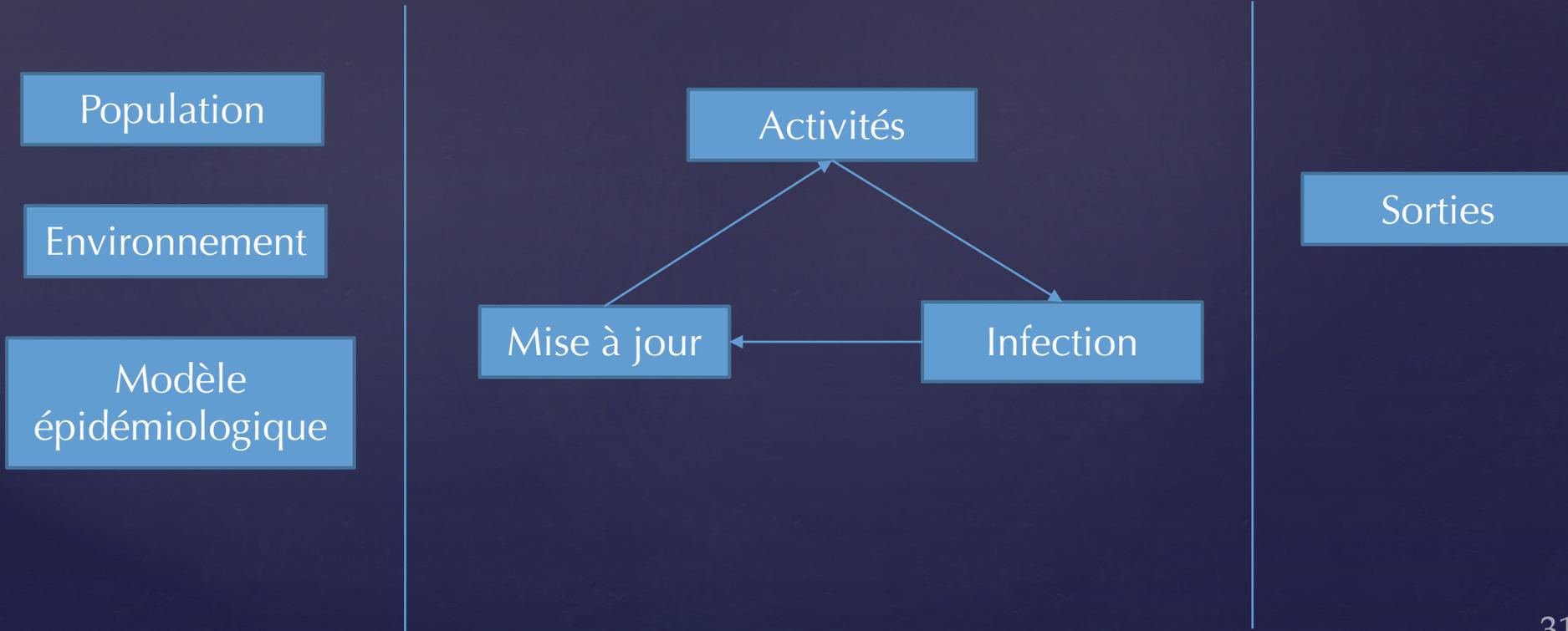
2. ... pour prédire les vagues épidémiques...

Différents types de modèles mathématiques :



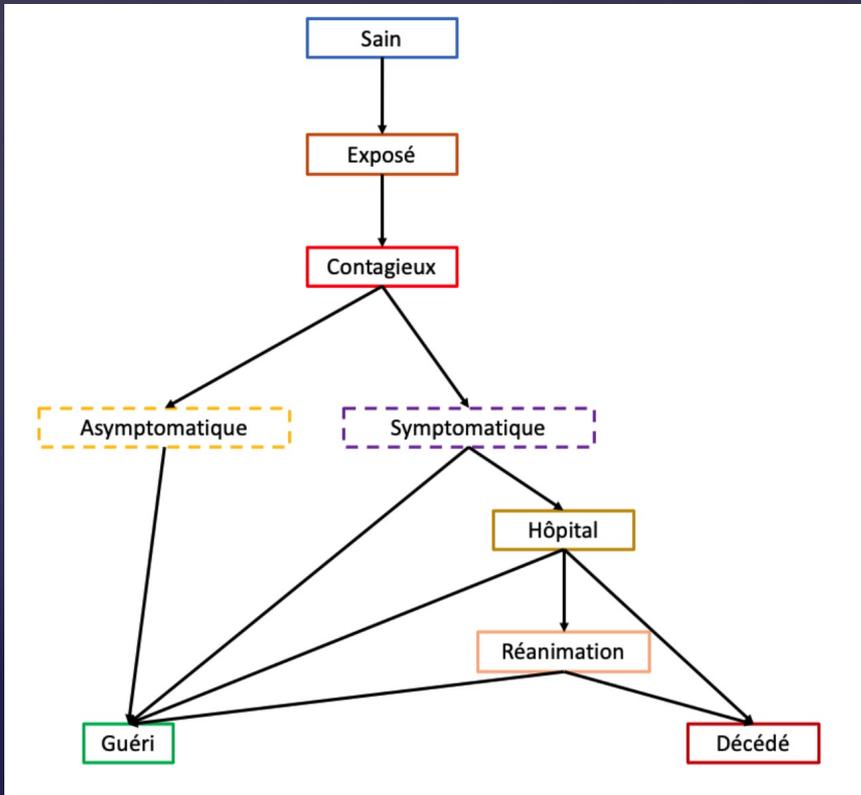
2. ... pour prédire les vagues épidémiques...

Structure principale du simulateur pour la COVID-19



2. ... pour prédire les vagues épidémiques...

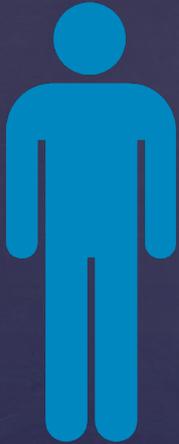
Modèle épidémiologique actuel dans le simulateur



Chaque individu possède un des 9 états :

- Passage d'un état à un autre déterminé modélisé par des lois de probabilités suivant la classe d'âge
- Basé sur un maximum d'études statistiques réalisées par Pasteur, Santé Publique France, etc.

2. ... pour prédire les vagues épidémiques...



- Age : **29 ans**
- Ménage : **id**
- Occupation : **actif**
- Entreprise : **id**
- Temps d'incubation : **5 jours**
- Début de la contagiosité : **- 1 jour**
- Durée de la contagiosité : **4 jours**
- Asymptomatique : **FALSE**
- Probabilité de transmission : **0.12**
- Hôpital : **FALSE**
- Réanimation : **FALSE**
- Décès : **FALSE**
- Confinement : **TRUE**
- Télé-travail : **TRUE**
- Vaccination : **30^{ème} jour**

2. ... pour prédire les vagues épidémiques...

De sain à **exposé** :

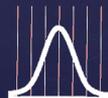
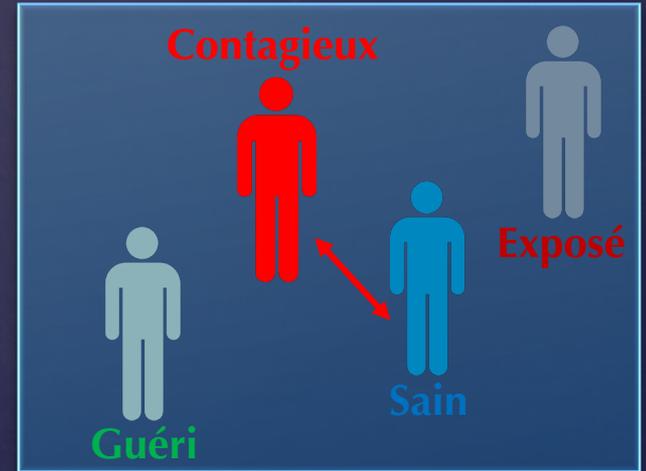
Equation de contamination individu-individu :

$$1 - \left(1 - \frac{\text{proba}_{\text{transmission}}}{\text{distance}^2} \right)^{\text{durée de contact}}$$

[Hoertel et al., 2020]

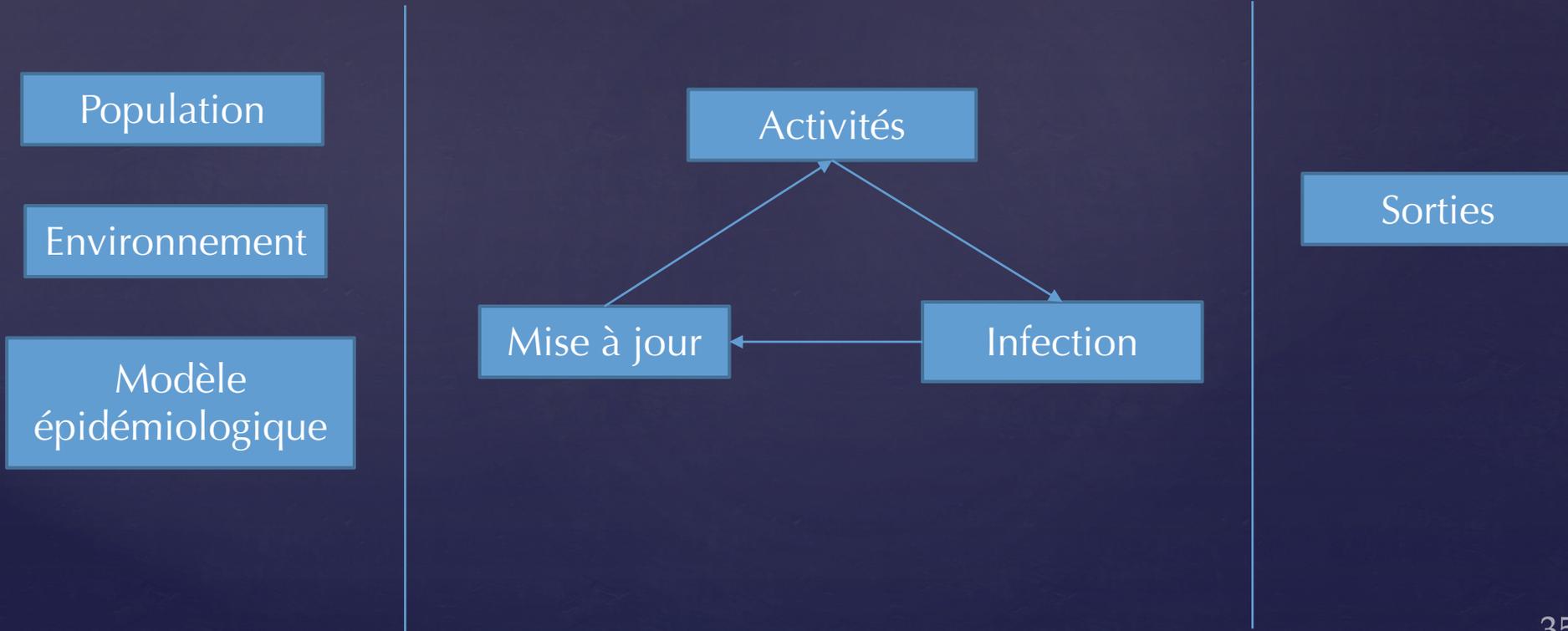
Dépendant de :

- Durée de contact [en heure]
- Distance entre individus [en mètre]
- Probabilité de transmission (différente pour chaque ind.)



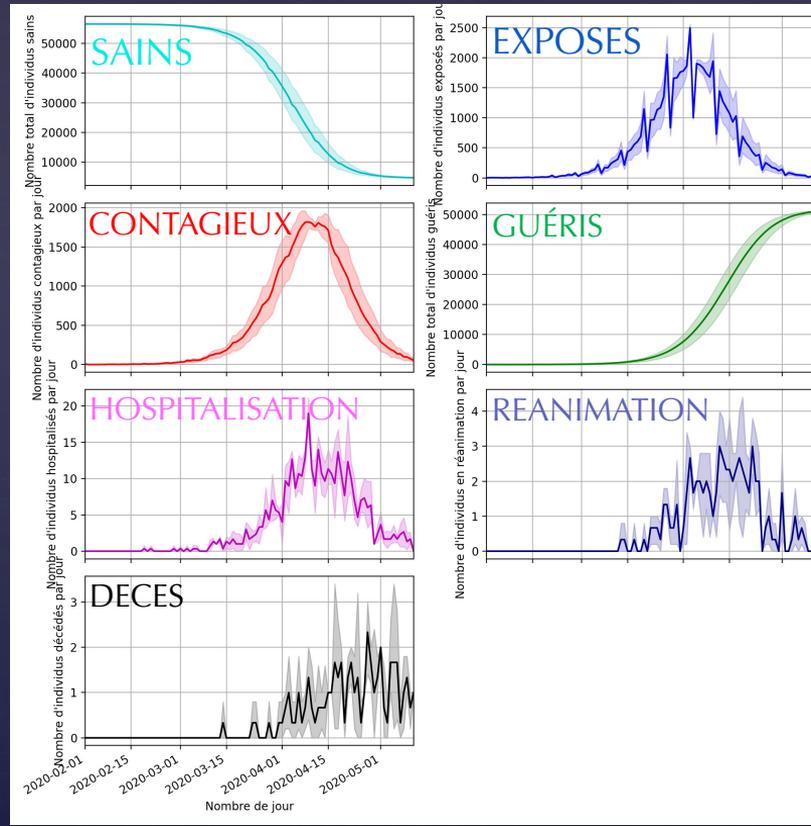
2. ... pour prédire les vagues épidémiques...

Structure principale du simulateur pour la COVID-19



2. ... pour prédire les vagues épidémiques...

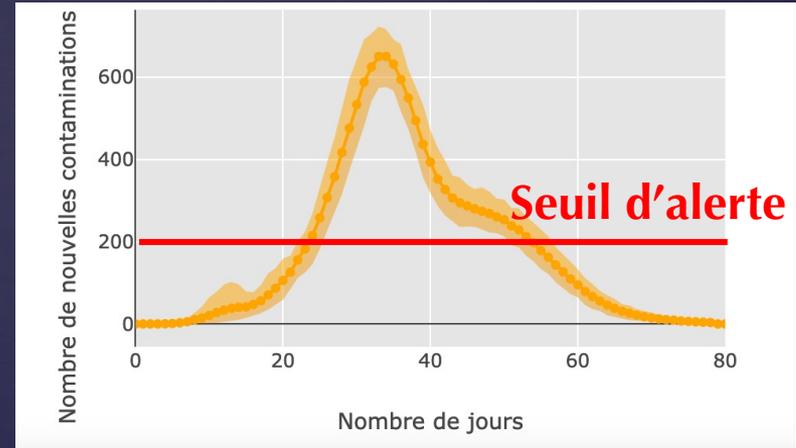
Exemples d'indicateurs épidémiologiques sur un jeu de paramètres pour le quartier Jussieu (56,000 individus)



2. ... pour prédire les vagues épidémiques...

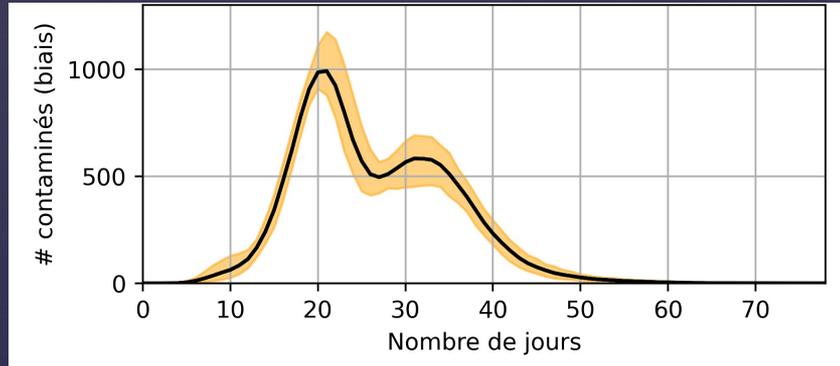
Application de mesures sanitaires

- Confinements
 - Fermeture des écoles/entreprises
 - % de télé-travail
 - Seuil d'alerte
 - Durée
- Scénario de confinements individuels
 - Tests ciblés sur certaines classes d'âges
 - Cas contact
 - Seuil d'alerte, durée, etc...
- Distanciation sociales
- Masques
- etc...

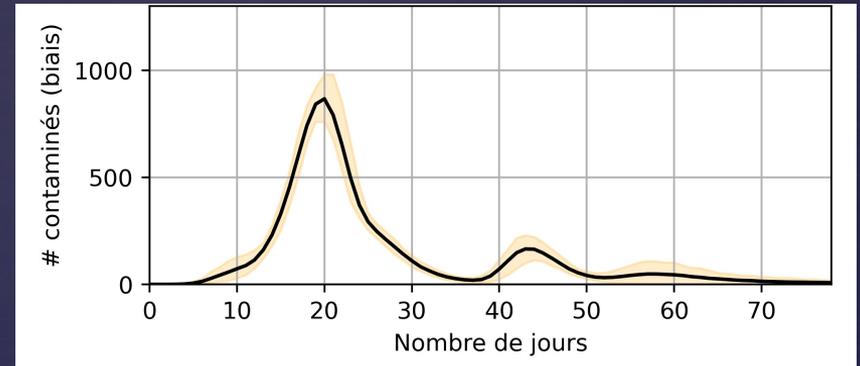


2. ... pour prédire les vagues épidémiques...

Sans stratégie sanitaire



Avec un confinement de 20 jours



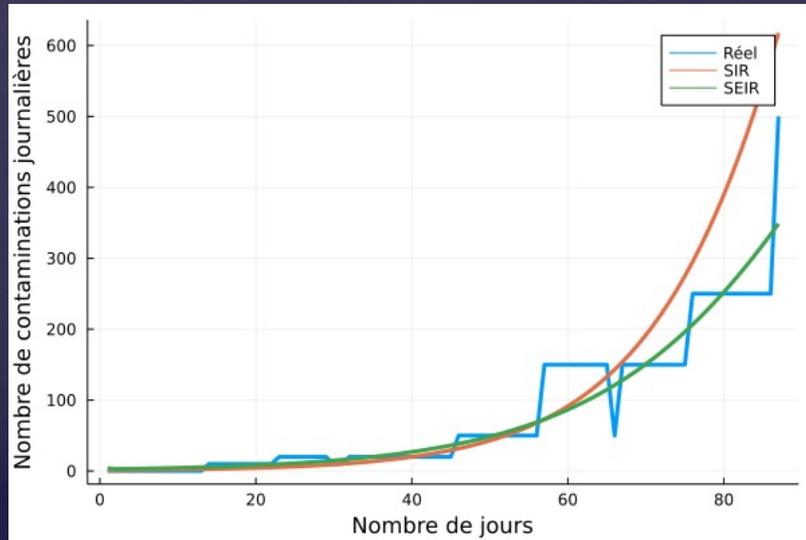
- Pics épidémiques plus faibles

2. ... pour prédire les vagues épidémiques...

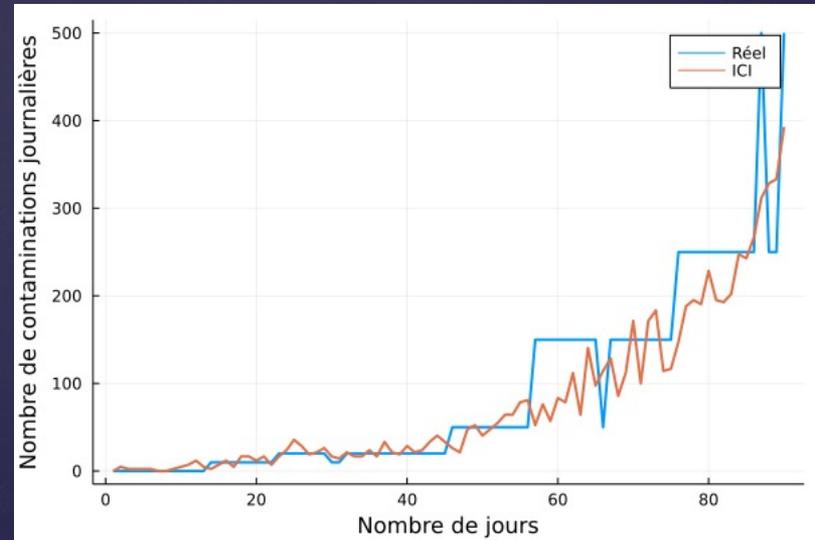
Un des enjeux majeurs du simulateur ICI :

« Prédire les effets des mesures sanitaires au début d'une vague épidémique »

Modèle compartimental type SEIR



Notre modèle ICI

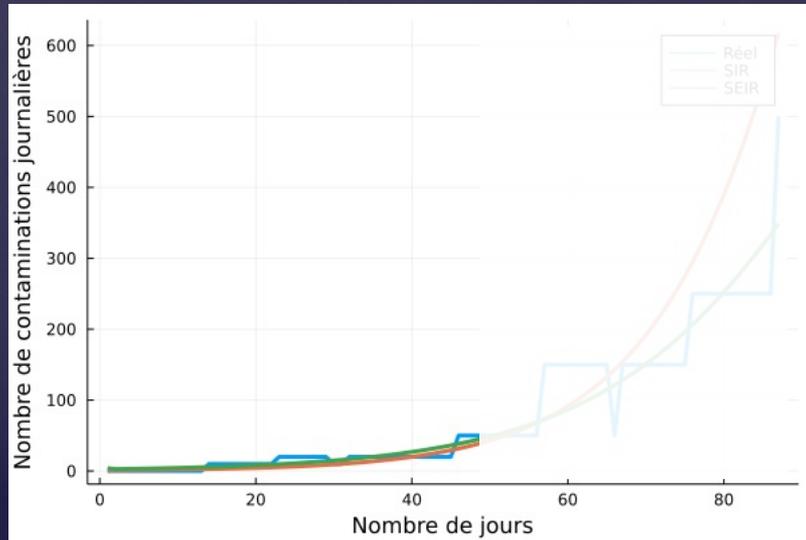


2. ... pour prédire les vagues épidémiques...

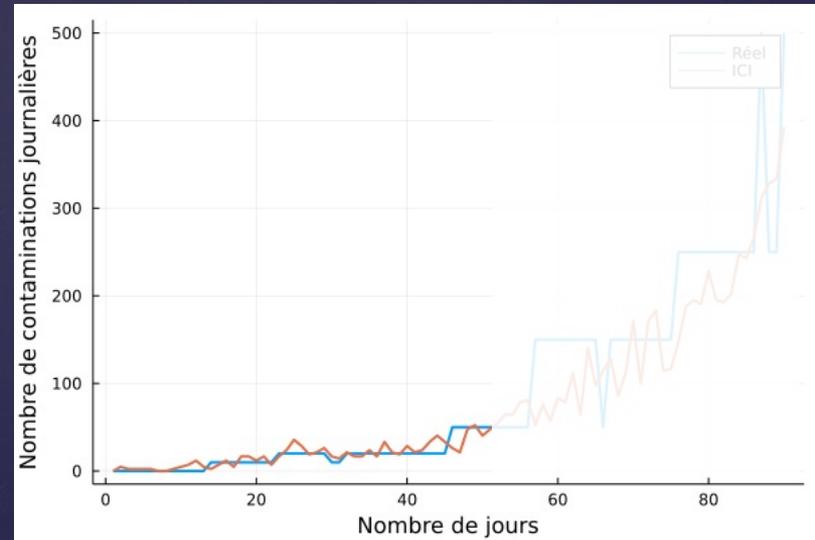
Un des enjeux majeurs du simulateur ICI :

« Prédire les effets des mesures sanitaires au début d'une vague épidémique »

Modèle compartimental type SEIR



Notre modèle ICI

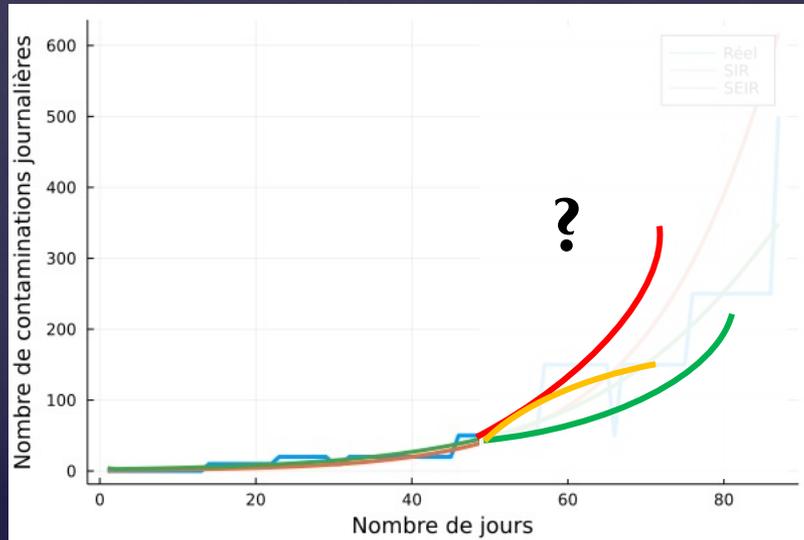


2. ... pour prédire les vagues épidémiques...

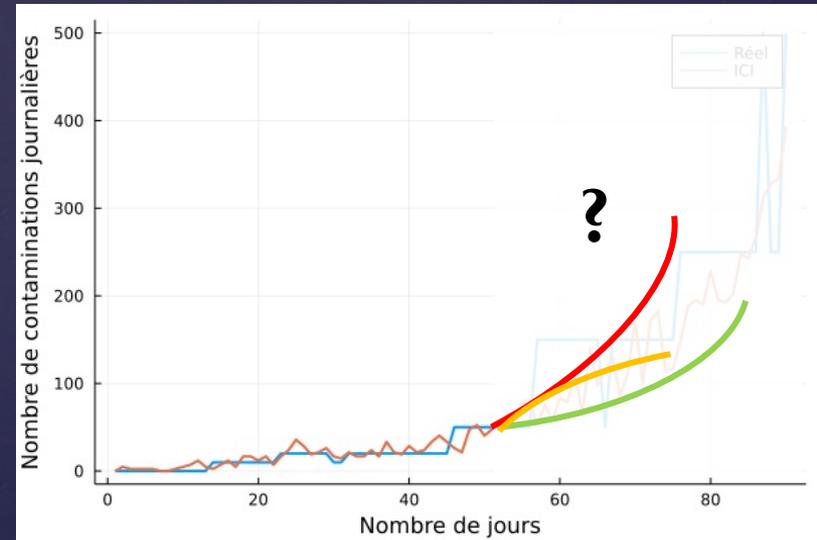
Un des enjeux majeurs du simulateur ICI :

« Prédire les effets des mesures sanitaires au début d'une vague épidémique »

Modèle compartimental type SEIR



Notre modèle ICI



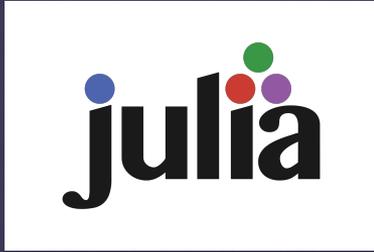
3. ... à l'aide du HPC ...

Modèle stochastique nécessitant du Monte-Carlo :

Réalisation d'une même simulation un nombre important de fois (de quelques milliers à plusieurs centaines de milliers)

=> Besoin **vital** d'outils HPC !

3. ... à l'aide du HPC ...



Simulateur écrit dans le langage Julia

Langage de haut-niveau pour le calcul scientifique

```
Documentation: https://docs.julialang.org  
Type "?" for help, "]"? for Pkg help.  
Version 1.7.0 (2021-11-30)  
Official https://julialang.org/ release  
  
julia> |
```

- Utilisation des outils de parallélisation (OpenMP, MPI, Hybride, SIMD)
- Importation de bibliothèques scientifiques (optimisation, fonctions mathématiques, gestion de formats de fichiers, etc.)

3. ... à l'aide du HPC ...

Plusieurs moyens de calculs pour lancer les simulations :

- **Calculateur INRIA** (Margaret) : 30 nœuds (600 cœurs) - 2 processeurs Intel® Xeon® CPU E5-2660 v2 @2.20 GHz avec 256 Go RAM
- **Calculateur Neowise** (Don AMD pour COVID) sur GRID'5000 : 10 nœuds (480 cœurs) - 1 CPU AMD EPYC 7642, 512 Go RAM
- **Calculateur Joliot-Curie/Irene-Rome** : 2292 nœuds (293 376 cœurs) bi-processeurs AMD Rome Epyc à 2.6 GHz

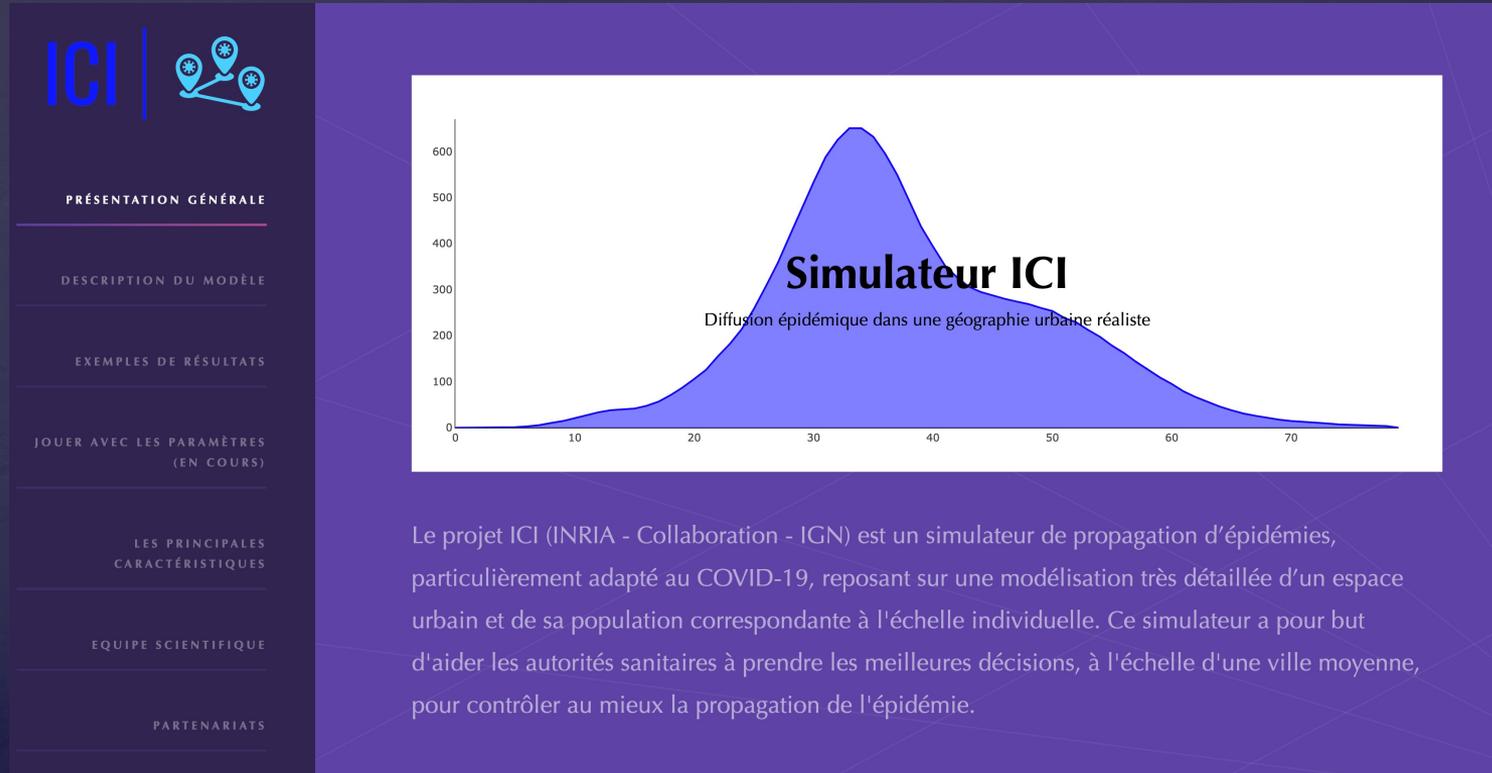
3. ... à l'aide du HPC ...

Quelques chiffres pour un quartier de Paris (Jussieu) :

- 56 000 individus
- 90 secondes CPU pour simuler 4 mois pour une seule simulation
- 1 jour CPU avec Monte-Carlo
- ~ 10,000 jeux de paramètres (sans à priori)
- 10,000 cœurs sur Irene => 1 jour temps réel !

4. ... pour aider les autorités sanitaires...

Développement d'un site internet *grand public* (<https://ici.saclay.inria.fr/>)

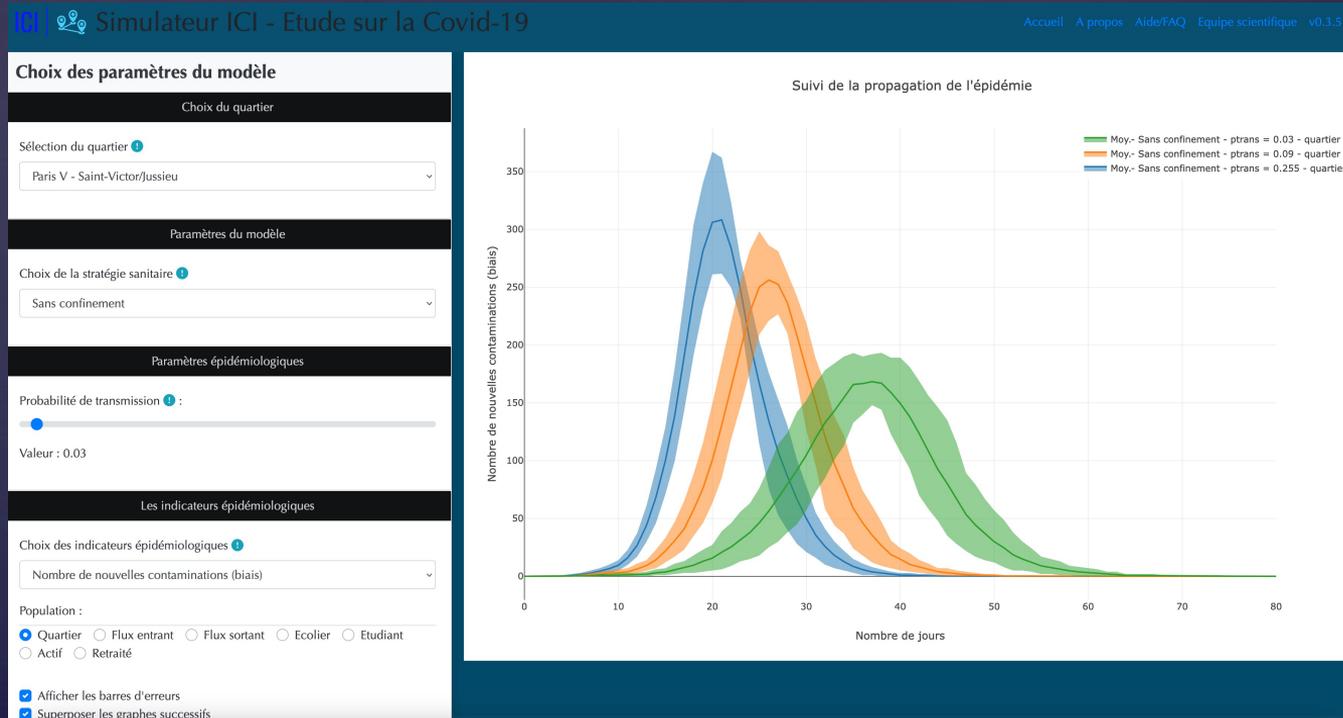


The image shows a screenshot of the ICI website interface on the left and a graph on the right. The website interface includes a navigation menu with the following items: PRÉSENTATION GÉNÉRALE, DESCRIPTION DU MODÈLE, EXEMPLES DE RÉSULTATS, JOUER AVEC LES PARAMÈTRES (EN COURS), LES PRINCIPALES CARACTÉRISTIQUES, EQUIPE SCIENTIFIQUE, and PARTENARIATS. The graph on the right is titled "Simulateur ICI" and shows a bell-shaped curve representing epidemic diffusion in a realistic urban geography. The x-axis ranges from 0 to 70, and the y-axis ranges from 0 to 600. The curve peaks at approximately x=35 and y=600. The text "Diffusion épidémique dans une géographie urbaine réaliste" is written below the curve.

Le projet ICI (INRIA - Collaboration - IGN) est un simulateur de propagation d'épidémies, particulièrement adapté au COVID-19, reposant sur une modélisation très détaillée d'un espace urbain et de sa population correspondante à l'échelle individuelle. Ce simulateur a pour but d'aider les autorités sanitaires à prendre les meilleures décisions, à l'échelle d'une ville moyenne, pour contrôler au mieux la propagation de l'épidémie.

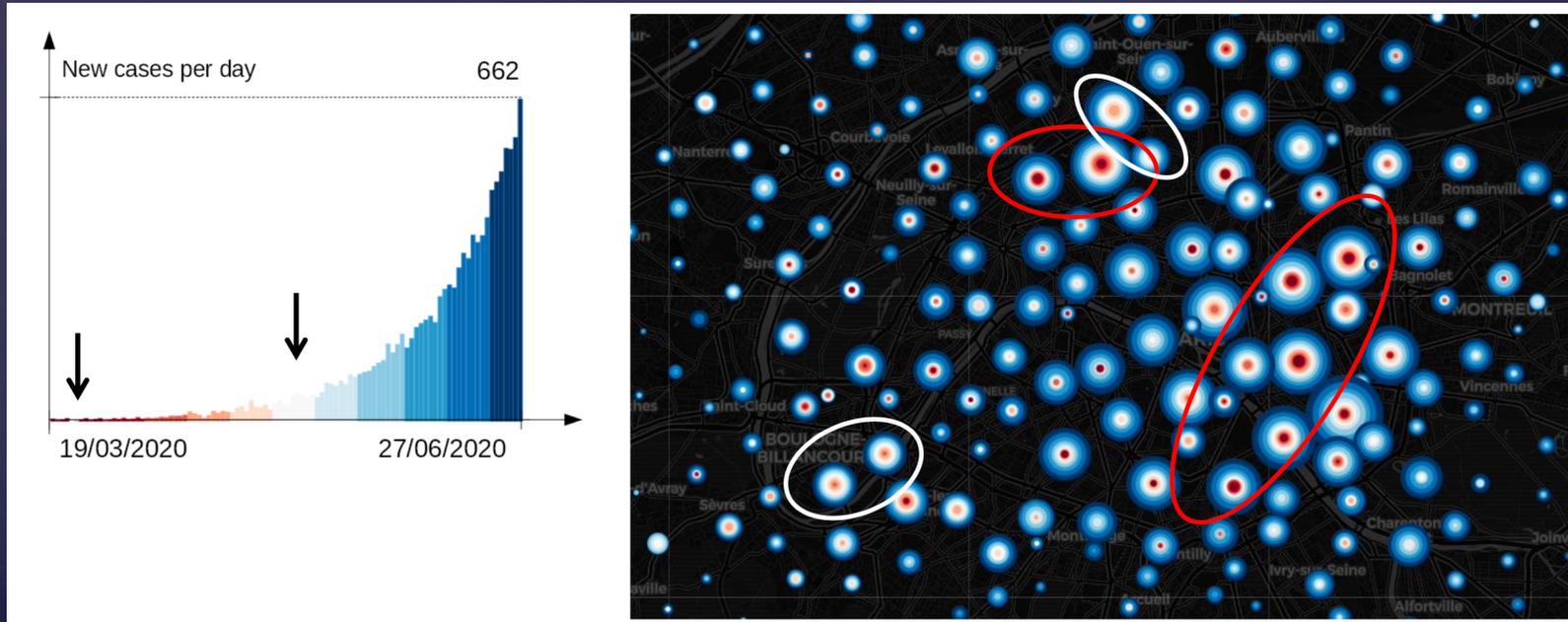
4. ... pour aider les autorités sanitaires...

Développement d'une interface utilisateur (Louis Nourry, stagiaire informatique)
(https://ici.saclay.inria.fr/index_app_v2.html)



4. ... pour aider les autorités sanitaires...

Travaux de visualisation spatiale de l'épidémie avec l'IGN



Bilan et perspectives

Modèle de présence d'individus :

- Génération d'une géographie urbaine détaillée
- Génération d'une population synthétique (article en cours de rédaction)
- Flux construit à partir de bases de données et d'enquêtes de déplacements
- *Données mobiles (en cours)*
- *Automatisation du modèle pour d'autres villes (futur)*

Prédiction de vagues épidémiques :

- Ajout d'un modèle épidémiologique dans le modèle de déplacement
- Equation de contamination (*réflexion*)
- Travaux de HPC
- *Phase de calibration et sensibilité (en cours)*
- *Comparaison avec d'autres modèles type SEIR (en cours)*
- *Passage à l'échelle de la ville/département (futur)*

Développement d'un site internet (<https://ici.saclay.inria.fr/>) et d'une interface utilisateur (en cours)

Bilan et perspectives

- Gestion des flux importants de population (conception de moyens de transport adaptés)



- Diagnostics de besoins énergétiques d'un quartier

Merci pour votre attention !