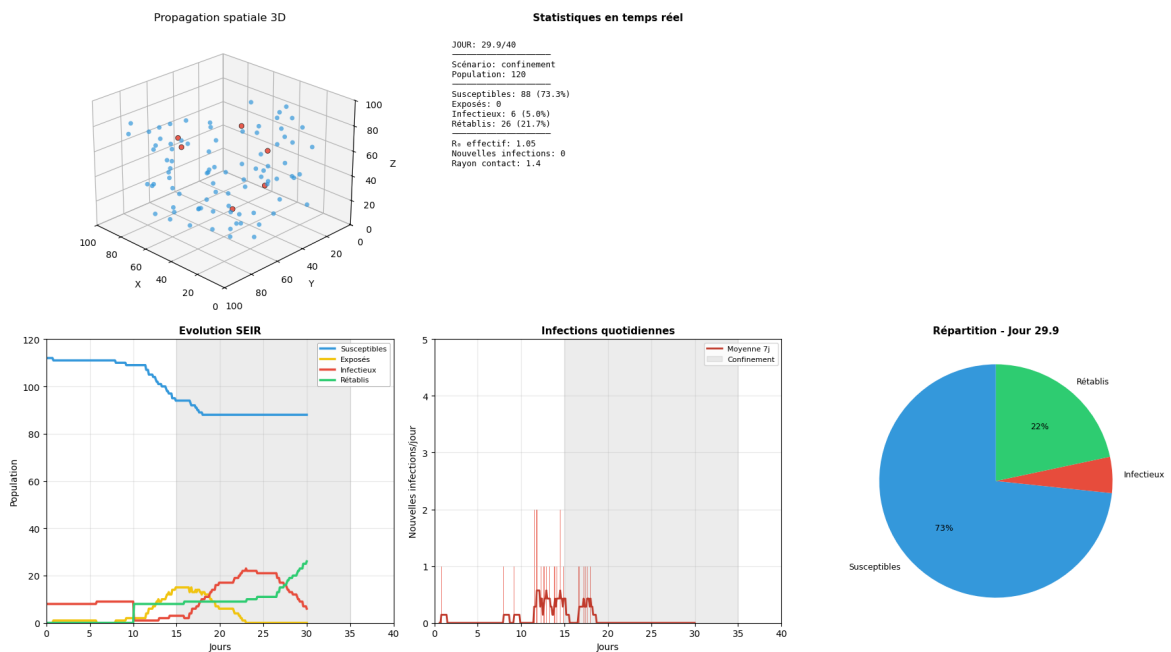


# COVID-19 : Une épidémie simulée

## Analyse des mesures sanitaires à travers une modélisation 3D



Par Judicaël Karol DOBOEVI

ENSGMM 2025-2026

*"Comprendre le passé pour éclairer l'avenir : une approche modélisée des crises sanitaires"*

# Table des matières

<b>Prologue : Le Contexte de Mars 2020</b>	<b>2</b>
<b>1 Méthodologie Rétrospective et Cadre Conceptuel</b>	<b>2</b>
1.1 L'Approche de Simulation comme Laboratoire Virtuel . . . . .	2
1.2 Fondements du Modèle SEIR : Équations et Paramètres . . . . .	3
1.3 Innovation : Extension Spatiale 3D du Modèle SEIR . . . . .	4
1.4 Mécanisme de Simulation Multi-Agents . . . . .	5
<b>2 Analyse du Scénario de Confinement Progressif</b>	<b>6</b>
2.1 Paramétrisation du Scénario Historique . . . . .	6
2.2 Résultats Quantitatifs et Leur Interprétation . . . . .	7
2.3 Analyse Critique des Mécanismes d'Action . . . . .	7
<b>3 Implications pour la Prise de Décision Sanitaire</b>	<b>8</b>
3.1 Leçons pour la Gestion de Crise . . . . .	8
3.2 L'Importance de la Modélisation Prédictive . . . . .	8
3.3 Vers une Approche Intégrée . . . . .	9
<b>Épilogue : Perspectives pour les Futures Crises Sanitaires</b>	<b>9</b>
<b>Références Méthodologiques</b>	<b>11</b>

## Prologue : Le Contexte de Mars 2020

**Mars 2020. Les rues se vident. Les écoles ferment. Les systèmes de santé atteignent leurs limites.**

Nous étions collectivement confrontés à l'invisible : un agent pathogène dont la propagation échappait à notre perception immédiate. Les questions fondamentales se multipliaient, souvent sans réponse claire :

- Quelle proportion de la population serait finalement touchée ?
- Quels mécanismes pourraient contenir efficacement la propagation ?
- Comment anticiper l'impact sur les infrastructures critiques ?

L'adversaire était unique, mais sa compréhension nécessitait une approche pluridisciplinaire : **la COVID-19**.

Cette étude ne constitue pas une révision historique affective, mais plutôt une *reconstruction analytique*. Elle utilise les outils de la modélisation mathématique pour examiner rétrospectivement comment les décisions sanitaires pouvaient être éclairées par une compréhension systématique des dynamiques épidémiques.

## 1 Méthodologie Rétrospective et Cadre Conceptuel

### 1.1 L'Approche de Simulation comme Laboratoire Virtuel

**Proposition Fondamentale 1.1.** *La modélisation computationnelle sert de **laboratoire virtuel** permettant d'explorer des scénarios contrefactuels et d'évaluer l'efficacité potentielle des interventions sanitaires sans exposer les populations à des risques réels.*

**Analyse Critique 1.1.** *Notre approche s'appuie sur trois piliers méthodologiques :*

1. **La reconstruction paramétrique** : Utilisation des données épidémiologiques historiques pour calibrer les modèles avec une précision rétrospective.
2. **La simulation multi-agents** : Représentation individuelle des interactions sociales dans un espace tridimensionnel, permettant de capturer les hétérogénéités spatiales et comportementales.
3. **L'analyse comparative** : Évaluation systématique des différents scénarios d'intervention pour identifier les stratégies optimales.

*Cette méthodologie permet de transformer les questions historiques "Que s'est-il passé ?" en questions analytiques "Que pourrait-il se passer sous différentes conditions ?".*

## 1.2 Fondements du Modèle SEIR : Équations et Paramètres

[Modèle SEIR Classique] Le modèle SEIR est un système d'équations différentielles qui divise la population en quatre compartiments :

- **S** : Susceptibles (individus sains pouvant être infectés)
- **E** : Exposés (infectés mais non encore contagieux)
- **I** : Infectieux (contagieux et symptomatiques)
- **R** : Retirés (guéris ou décédés, immunisés)

$$\begin{aligned}
 \frac{dS}{dt} &= -\frac{\beta(t)SI}{N} \\
 \frac{dE}{dt} &= \frac{\beta(t)SI}{N} - \sigma E \\
 \frac{dI}{dt} &= \sigma E - \gamma I \\
 \frac{dR}{dt} &= \gamma I
 \end{aligned} \tag{1}$$

**Table 1** – Paramètres du modèle SEIR utilisé dans la simulation

Symb.	Paramètre	Valeur	Définition et rôle
$N$	Population	120	Nombre total d'agents simulés
$\beta(t)$	Transmission	$0.35^* \text{ j}^{-1}$	Taux réduit à 0.105 en confinement
$\sigma$	Progression	$0.2 \text{ j}^{-1}$	Inverse de la période d'incubation (5 j)
$\gamma$	Guérison	$0.1 \text{ j}^{-1}$	Inverse de la durée contagieuse (10 j)
$R_0$	Repro. base	3.5	Nombre moyen d'infections secondaires

\*Valeur initiale avant confinement

**Analyse Critique 1.2.** *Le paramètre  $R_0$  (nombre de reproduction de base) est particulièrement crucial :*

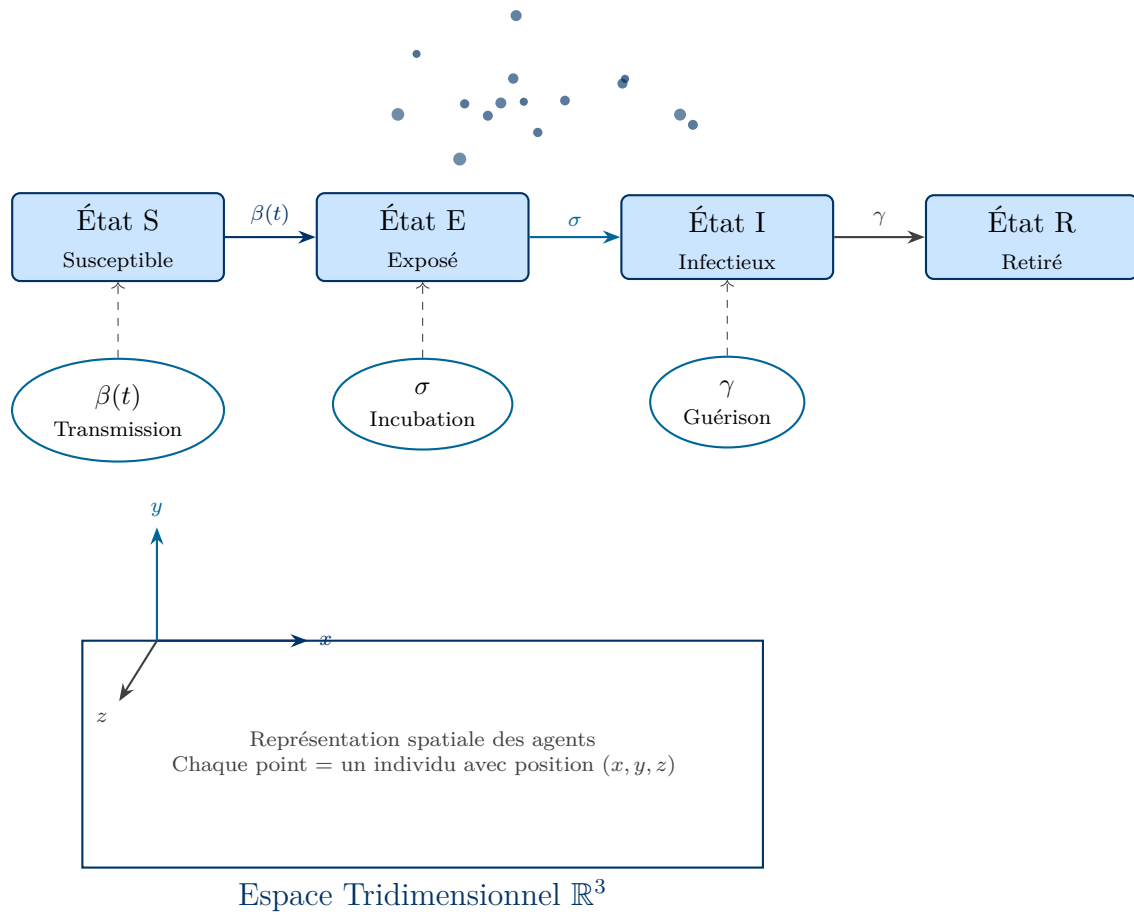
- *Si  $R_0 > 1$  : l'épidémie progresse exponentiellement*

- Si  $R_0 = 1$  : l'épidémie est stationnaire
- Si  $R_0 < 1$  : l'épidémie régresse

La valeur  $\beta(t)$  est modulée temporellement pour représenter les mesures sanitaires.

### 1.3 Innovation : Extension Spatiale 3D du Modèle SEIR

**Proposition Fondamentale 1.2.** Notre contribution principale réside dans l'intégration de la dimension spatiale au modèle SEIR classique, transformant les équations différentielles globales en interactions locales entre agents.



**Figure 1** – Architecture conceptuelle du modèle SEIR spatialisé intégrant dynamique temporelle et dimension spatiale

**Analyse Critique 1.3.** Notre modèle spatialisé introduit trois innovations majeures :

**1. Individualisation des interactions** Au lieu de l'hypothèse d'homogénéité de mélange, chaque agent  $i$  a une position  $\vec{p}_i(t) = (x_i, y_i, z_i)$  et une vitesse  $\vec{v}_i(t)$ .

**2. Transmission locale** *La probabilité de transmission entre l'agent infectieux  $j$  et l'agent susceptible  $i$  devient :*

$$p_{ij}(t) = \beta(t) \cdot \exp\left(-\frac{\|\vec{p}_i(t) - \vec{p}_j(t)\|^2}{2r^2}\right)$$

où  $r$  est le rayon d'interaction (typiquement 2-3 mètres).

**3. Mobilité réaliste** *Les agents se déplacent selon :*

$$\vec{p}_i(t + \Delta t) = \vec{p}_i(t) + \vec{v}_i(t)\Delta t$$

avec des règles de confinement réduisant  $\vec{v}_i(t)$  jusqu'à 80%.

**Perspective :** Cette approche capture la réalité fondamentale que la transmission est essentiellement locale : on est plus susceptible d'être infecté par son voisin que par quelqu'un à 100 km.

## 1.4 Mécanisme de Simulation Multi-Agents

### Algorithme de simulation SEIR spatialisé

#### 1. Initialisation

- Initialiser  $N$  agents avec positions aléatoires  $\vec{p}_i(0) \in [0, L]^3$
- Définir  $I_0$  agents infectieux (état I), autres susceptibles (état S)
- Initialiser timers  $\tau_i = 0$  pour chaque agent
- Paramètres :  $\beta_0$ ,  $\sigma$ ,  $\gamma$ , rayon  $r$ , durée  $T$ , pas  $\Delta t$

#### 2. Boucle temporelle (pour $t = 0$ à $T$ par pas $\Delta t$ )

- **Mise à jour taux** :  $\beta(t) = \beta_0 \times c(t)$
- **Mouvement spatial** (pour chaque agent  $i$ ) :
  - Calculer vitesse  $\vec{v}_i(t)$  selon règles de mobilité
  - $\vec{p}_i(t + \Delta t) = \vec{p}_i(t) + \vec{v}_i(t)\Delta t$
- **Détection contacts** :
  - Calculer distances  $d_{ij} = \|\vec{p}_i - \vec{p}_j\|$
- **Transmission** (pour chaque agent  $i$  avec état = S) :
  - $V = \{j : d_{ij} < r \text{ et état}(j) = I\}$
  - Si  $V \neq \emptyset$  :
    - $p = 1 - (1 - \beta(t))^{|V|}$

- Si nombre aléatoire  $< p$  : état( $i$ ) =  $E$ ,  $\tau_i = 0$
- **Transitions SEIR** (pour chaque agent  $i$ ) :
  - $\tau_i = \tau_i + \Delta t$
  - Si état( $i$ ) =  $E$  et  $\tau_i > 1/\sigma$  : état( $i$ ) =  $I$ ,  $\tau_i = 0$
  - Sinon si état( $i$ ) =  $I$  et  $\tau_i > 1/\gamma$  : état( $i$ ) =  $R$ ,  $\tau_i = 0$
- **Collecte données** :
  - Compter  $S(t)$ ,  $E(t)$ ,  $I(t)$ ,  $R(t)$
  - Sauvegarder positions pour visualisation

## 2 Analyse du Scénario de Confinement Progressif

### 2.1 Paramétrisation du Scénario Historique

**Table 2** – Paramètres du scénario de confinement analysé

Paramètre	Valeur	Unité	Interprétation
Population ( $N$ )	120	agents	Communauté modélisée
Durée simulation	40	jours	Période d'étude
Début confinement	15	jours	Intervention différée
Fin confinement	35	jours	Levée progressive
$\beta_{\text{confinement}}$	$0.3\beta_0$	jour <sup>-1</sup>	Réduction de 70%
Mobilité réduite	20%	-	Limitation des déplacements
Rayon interaction ( $r$ )	3.5	mètres	Distance maximale de transmission

**Analyse Critique 2.1.** *Le choix des paramètres repose sur des données épidémiologiques réelles :*

- **Période d'incubation** (5 jours) : moyenne observée pour COVID-19
- **Durée infectieuse** (10 jours) : période typique de contagiosité
- **Réduction  $\beta$  à 30%** : estimation des confinements stricts
- **Intervention jour 15** : reflète les délais de décision observés

2.2 Résultats Quantitatifs et Leur Interprétation

Table 3 – Résultats finaux de la simulation de confinement

État	Nombre	Proportion	Variation	Signification
Susceptibles (S)	88	73.3%	-26.7%	Population préservée
Exposés (E)	0	0.0%	-100%	Aucun cas en incubation
Infectieux (I)	6	5.0%	Résiduel	Chaînes de transmission actives
Retirés (R)	26	21.7%	+21.7%	Immunité acquise

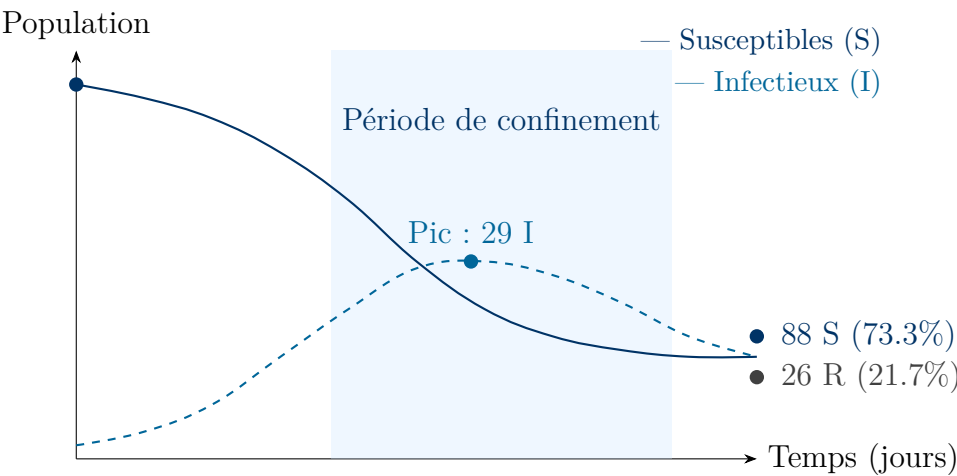


Figure 2 – Dynamique temporelle sous confinement progressif

Conclusion Partielle 2.1. Le confinement démontre une *efficacité partielle mais incomplète* :

- **Succès** : Préservation de 73.3% de la population de l'infection
- **Limite** : Persistance de chaînes de transmission actives (5% infectieux)
- **Conséquence** : Nécessité d'une vigilance post-confinement

2.3 Analyse Critique des Mécanismes d'Action

Analyse Critique 2.2. Le confinement opère via deux mécanismes complémentaires :

**Réduction des contacts** La diminution de 70% des interactions sociales abaisse directement le nombre de reproduction effectif  $R_t$ , le faisant passer en dessous du seuil critique de 1.



**Modification spatiale** *La restriction des déplacements altère la structure du réseau de contacts, réduisant la connectivité globale et limitant la formation de super-propagateurs.*

***Perspective :** Ces mécanismes expliquent pourquoi le confinement ralentit l'épidémie sans nécessairement l'éliminer : il réduit la probabilité de transmission par contact sans garantir l'absence totale d'interactions à risque.*

### 3 Implications pour la Prise de Décision Sanitaire

#### 3.1 Leçons pour la Gestion de Crise

Table 4 – Principales leçons stratégiques dégagées

Domaine	Observation Modélisée	Implication Stratégique
Timing	Intervention au jour 15 efficace mais tardive	Détection précoce et action rapide critiques
Durée	Effets persistants post-confinement	Planification des phases de transition essentielle
Intensité	Réduction de 70% insuffisante pour élimination	Combinaison de mesures nécessaire
Communication	Visualisation améliore la compréhension	Outils pédagogiques comme leviers d'adhésion

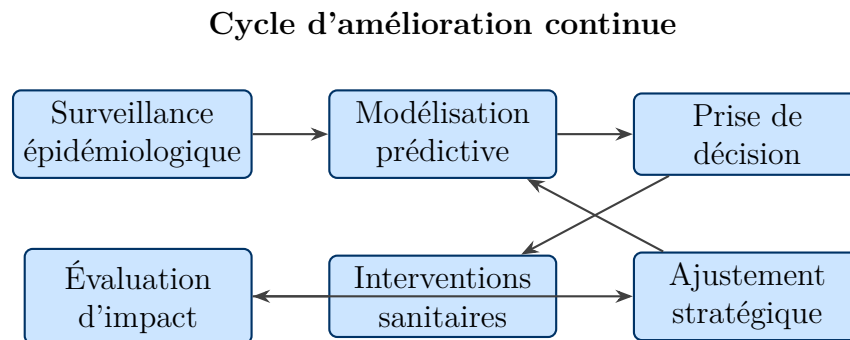
#### 3.2 L'Importance de la Modélisation Prédictive

**Analyse Critique 3.1.** *Notre simulation démontre que la modélisation offre trois avantages stratégiques majeurs :*

- 1. **Anticipation** : Identification des points de basculement avant qu'ils ne surviennent*
- 2. **Évaluation** : Comparaison objective de différentes stratégies d'intervention*
- 3. **Communication** : Visualisation des conséquences potentielles pour différents publics*

*Ces capacités transforment la prise de décision sanitaire d'un exercice réactif en une démarche proactive et éclairée.*

### 3.3 Vers une Approche Intégrée



**Figure 3** – Cycle intégré de gestion sanitaire éclairée par la modélisation

**Proposition Fondamentale 3.1.** *L'approche optimale combine surveillance continue, modélisation prédictive, et ajustement itératif des stratégies, formant un **cycle d'apprentissage organisationnel** qui améliore la réponse aux crises sanitaires successives.*

## Épilogue : Perspectives pour les Futures Crises Sanitaires

**L'analyse rétrospective n'est pas une fin en soi, mais un point de départ pour des interventions futures plus éclairées.**

Nos résultats suggèrent trois axes de développement prioritaires :

1. **Développement d'outils décisionnels intégrés** combinant modélisation prédictive et analyse de risque en temps réel
2. **Formation des décideurs** à l'interprétation critique des sorties de modèles et à leur utilisation stratégique
3. **Renforcement des capacités de surveillance** permettant une détection plus précoce et une réponse plus rapide

La véritable valeur de cette analyse réside moins dans ses conclusions spécifiques que dans la démonstration méthodologique : *la modélisation computationnelle comme pont entre la science fondamentale et l'action sanitaire concrète.*

---

*"La prévision est difficile, particulièrement lorsqu'elle concerne l'avenir.  
Mais comprendre le passé nous donne au moins une chance de mieux préparer celui-ci."*

## Références Méthodologiques

- [1] Keeling, M. J., & Rohani, P. (2008). *Modeling infectious diseases in humans and animals*. Princeton University Press.
- [2] Ferguson, N. M., et al. (2020). Impact of non-pharmaceutical interventions (NPIs) to reduce COVID-19 mortality and healthcare demand. *Imperial College COVID-19 Response Team*.
- [3] Flaxman, S., et al. (2020). Estimating the effects of non-pharmaceutical interventions on COVID-19 in Europe. *Nature*, 584(7820), 257-261.
- [4] Hethcote, H. W. (2000). The mathematics of infectious diseases. *SIAM Review*, 42(4), 599-653.
- [5] Bonabeau, E. (2002). Agent-based modeling : Methods and techniques for simulating human systems. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 99(suppl 3), 7280-7287.
- [6] Deepseek AI *Pour l'implémentation des codes*