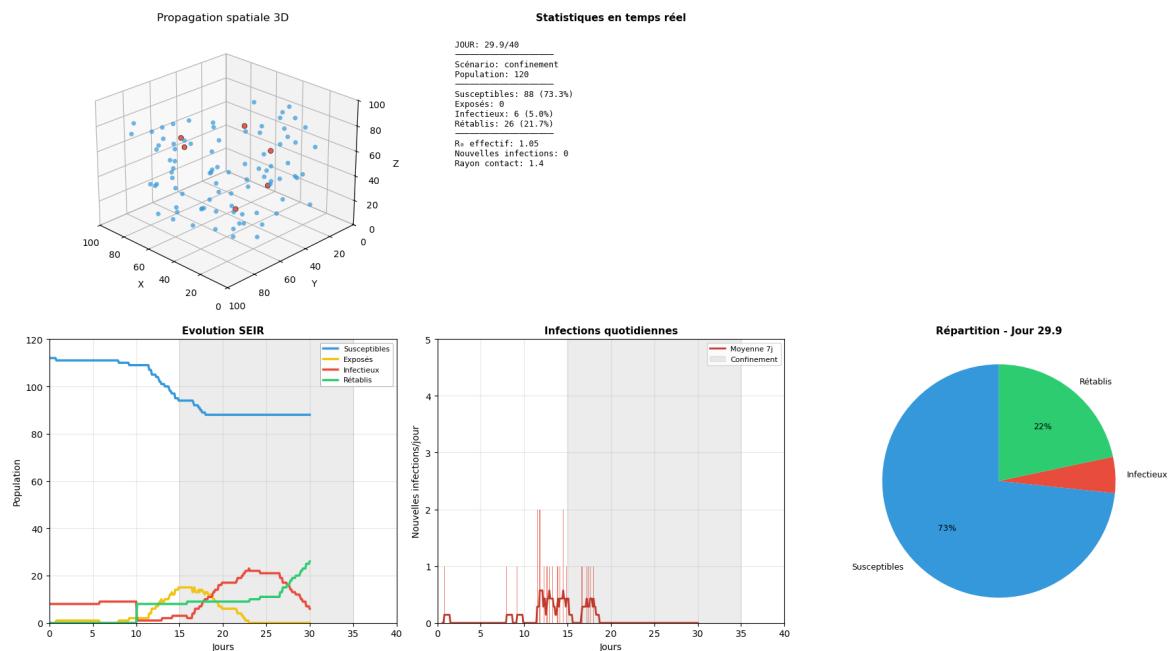


COVID-19 : Une épidémie simulée

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

Prologue : Le Contexte de Mars 2020	2
1 Méthodologie Rétrospective et Cadre Conceptuel	2
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
2 Analyse du Scénario de Confinement Progressif	6
2.1 Paramétrisation du Scénario Historique	6
2.2 Résultats Quantitatifs et Leur Interprétation	7
2.3 Analyse Critique des Mécanismes d'Action	7
3 Implications pour la Prise de Décision Sanitaire	8
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
Épilogue : Perspectives pour les Futures Crises Sanitaires	9
Références Méthodologiques	11

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^* j^{-1}	Taux réduit à 0.105 en confinement
σ	Progression	$0.2 j^{-1}$	Inverse de la période d'incubation (5 j)
γ	Guérison	$0.1 j^{-1}$	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.

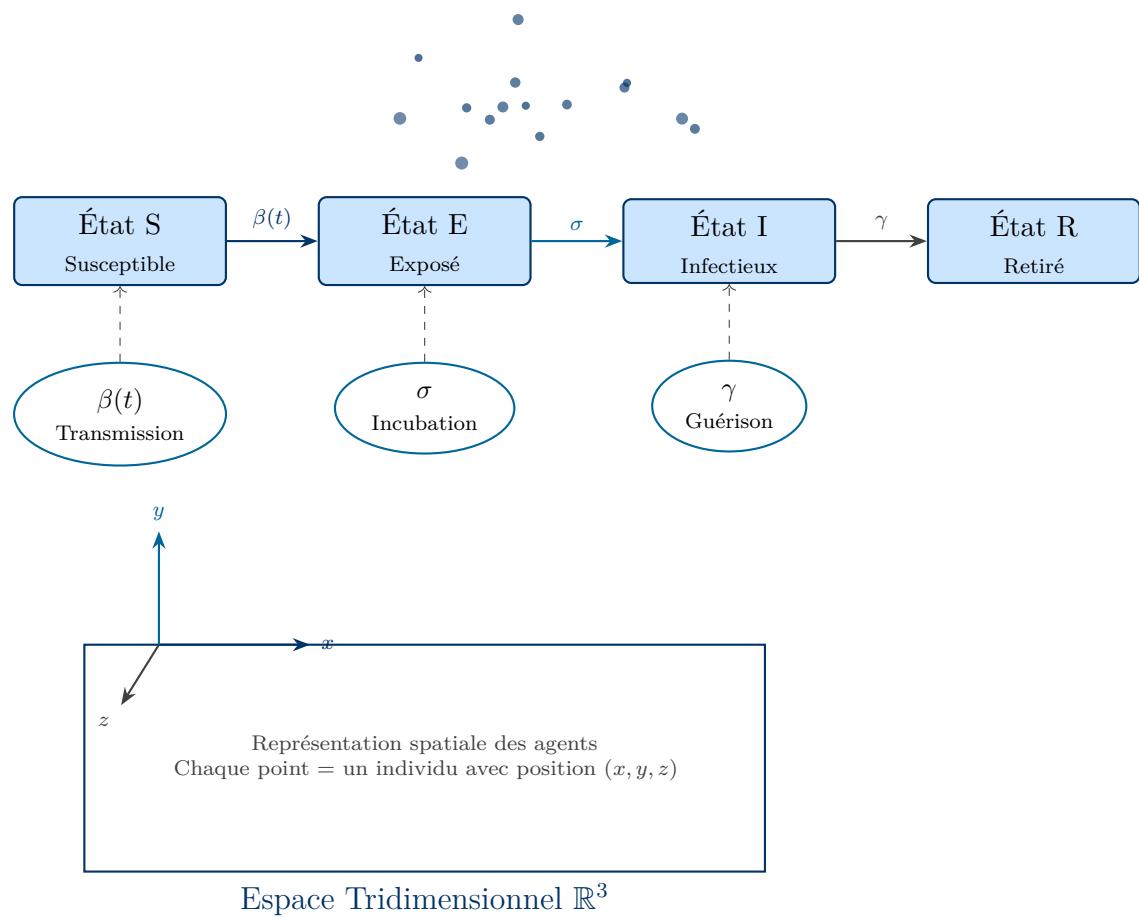


Figure 1 – Architecture conceptuelle du modèle SEIR spatialisé intégrant dynamique temporelle et dimension spatiale

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 : β_0 , σ , γ , rayon r , durée T , pas Δt

2. Boucle temporelle (pour $t = 0$ à T par pas Δt)

- **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 $^{-1}$	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 β 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

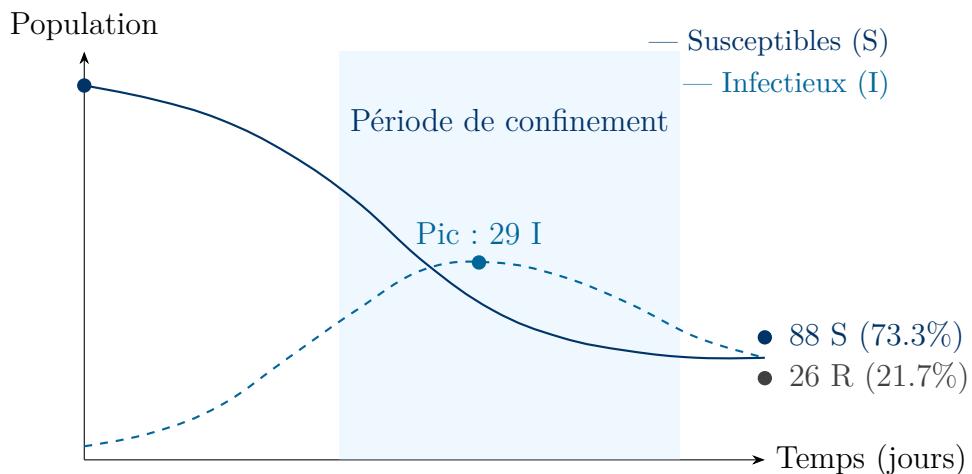


Figure 2 – Dynamique temporelle sous confinement progressif

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

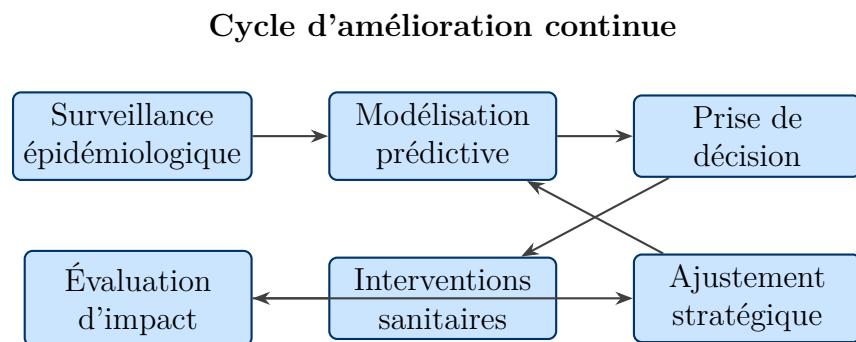


Figure 3 – Cycle intégré de gestion sanitaire éclairée par la modélisation

Proposition Fondamentale 3.1. *L'approche optimale combine surveillance continue, modélisation prédictive, et ajustement itératif des stratégies, formant un **cyclé 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*