

Covid-19: de la crise des modèles aux modèles de la crise



Daniel KROB, INCOSE Fellow

Novembre 2023



CESAMES

Modélisation systémique

Création



Spin-off – 2011




Equipe

≈ 40
architectes & collaborateurs

Bureaux

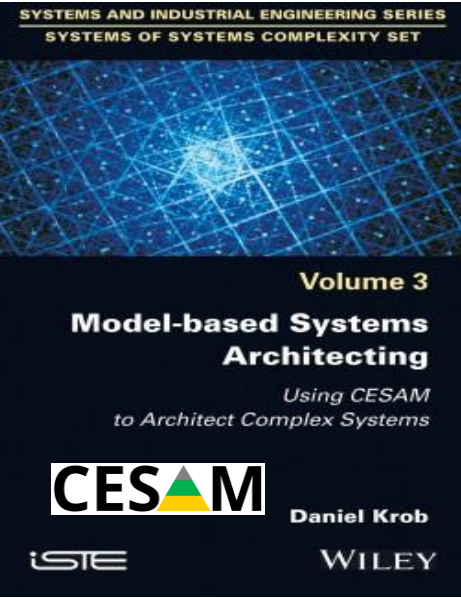
Paris
Toulouse
Shanghai

Communauté

Ecosystème de clients industriels

| | | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>Aéronautique</p>  <p>+ CORAC, Daher Dassault Aviation</p> | <p>Energie</p>  <p>+ Rolls Royce, Technip</p> | <p>Ferroviaire</p>  |
| <p>Automobile</p>  <p>+ Mitsubishi</p> | <p>Espace & défense</p>  <p>+ Dassault Aviation, Kawasaki, Thalès</p> | <p>Logistique</p>  |
| <p>Construction</p>  <p>+ Eiffage, Saint-Gobain, Vinci</p> | <p>High tech</p>  <p>+ A3BC, Dassault Systèmes, PTC</p> | <p>Minne</p>  |
| <p>Innovation</p>  <p>+ Caisse des dépôts, Opéra National de Paris, Pôle Emploi</p> | | |



Méthode CESAM utilisée sur > 2,000 projets de développement

La référence principale de notre travail

Received: 2 May 2020 | Revised: 22 July 2020 | Accepted: 22 July 2020
 DOI: 10.1002/sys.21557

REGULAR PAPER

WILEY

Handling the COVID-19 crisis: Toward an agile model-based systems approach

Olivier de Weck¹ | Daniel Krob² | Li Lefei³ | Pao Chuen Lui⁴ | Antoine Rauzy⁵ | Xinguo Zhang³

¹Institute for Data, Systems and Society, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts
²Center of Excellence on Systems Architecture Management Economy & Strategy (CESAMES), Paris, France
³Tsinghua University, Beijing, China
⁴National University of Singapore, Singapore
⁵Norwegian University of Science & Technology, Trondheim, Norway

Correspondence
 Olivier de Weck, 33-410, Massachusetts Institute of Technology, 77 Massachusetts Avenue, Cambridge, MA 02139, USA.
 Email: deweck@mit.edu

Abstract
 The COVID-19 pandemic has caught many nations by surprise and has already caused millions of infections and hundreds of thousands of deaths worldwide. It has also exposed a deep crisis in modeling and exposed a lack of systems thinking by focusing mainly on only the short term and thinking of this event as only a health crisis. In this paper, authors from several of the key countries involved in COVID-19 propose a holistic systems model that views the problem from a perspective of human society including the natural environment, human population, health system, and economic system. We model the crisis theoretically as a feedback control problem with delay, and partial controllability and observability. Using a quantitative model of the human population allows us to test different assumptions such as detection threshold, delay to take action, fraction of the population infected, effectiveness and length of confinement strategies, and impact of earlier lifting of social distancing restrictions. Each conceptual scenario is subject to 1000+ Monte-Carlo simulations and yields both expected and surprising results. For example, we demonstrate through computational experiments that maintaining strict confinement policies for longer than 60 days may indeed be able to suppress lethality below 1% and yield the best health outcomes, but cause economic damages due to lost work that could turn out to be counterproductive in the long term. We conclude by proposing a hierarchical Computerized, Command, Control, and Communications (C4) information system and enterprise architecture for COVID-19 with real-time measurements and control actions taken at each level.

KEYWORDS
 Decision Analysis/Management, Modeling and Simulation, Systems Thinking

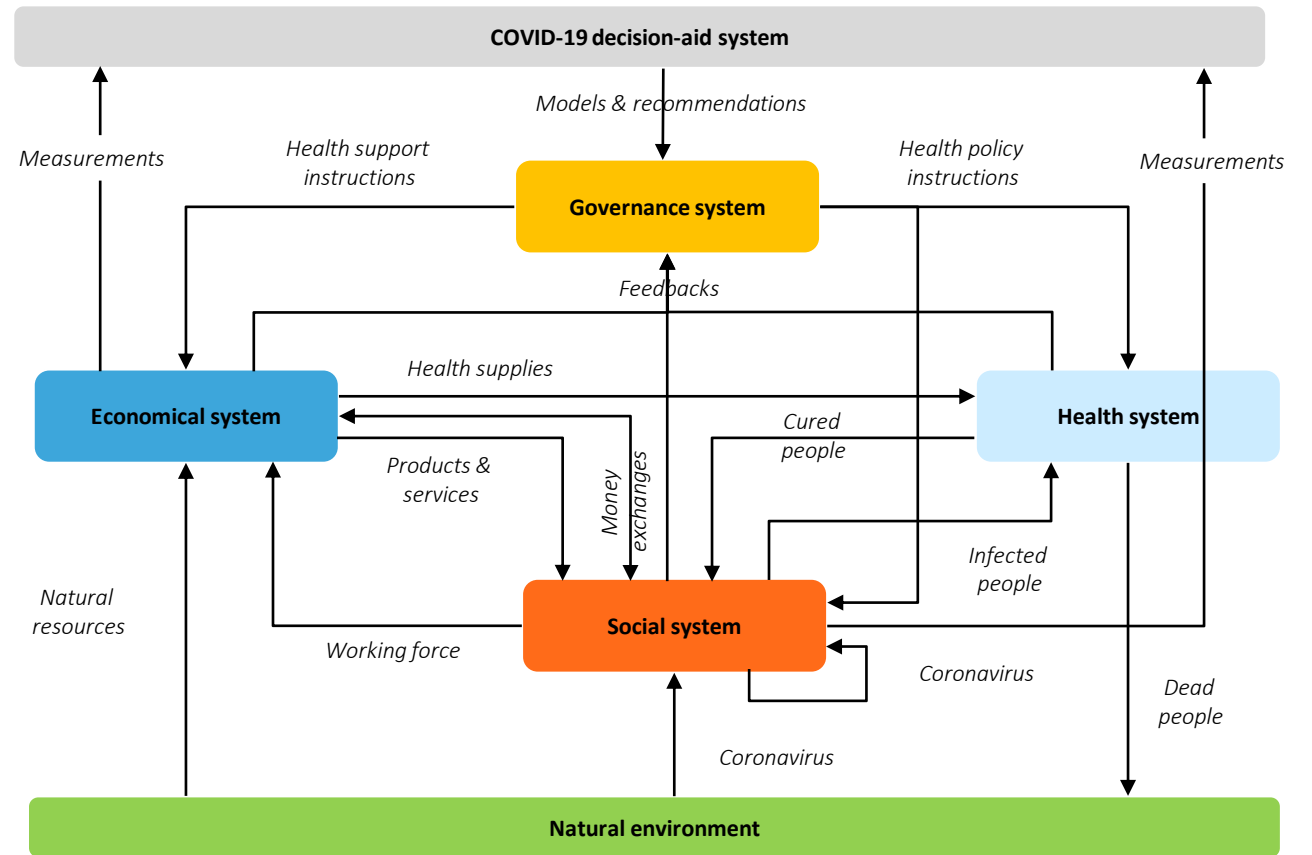
1 | INTRODUCTION

The COVID-19 crisis (see Refs. 1 and 2) took many by surprise. Globally, most of the nations were underprepared. Moreover, they reacted in quite different ways when the pandemic unfolded, as it can be observed by the various dynamics per country in terms of confirmed deaths due to COVID-19 per million inhabitants (see Refs. 3, 4, and 5 and Figure 1). In this paper, we argue that one of the root causes of this unpreparedness and difference in reaction is due to the lack of conceptual and methodological tools to think about the crisis as a complex system which led the global community to use inadequate modeling approaches. We advocate that systems engineering is a first-in-class candidate to provide such tools. The COVID-19 crisis should be seen as a control problem with delay and uncertainty that requires a model-based agile and multilayered systems engineering approach.

The COVID-19 crisis has a striking extent, both in time and space. It is going to have impact during an unknown, but probably prolonged period of 18 months or longer, affecting all activities on Earth, which

Systems Engineering 2020;1-15. | wileyonlinelibrary.com/journal/sys | © 2020 Wiley Periodicals LLC | 1

Meilleur article 2020 de la revue "Systems Engineering"



Notre **article fondateur** où nous avons proposé une **approche de jumeau numérique systémique** pour modéliser la crise du covid-19



Agenda

1. La crise des modèles

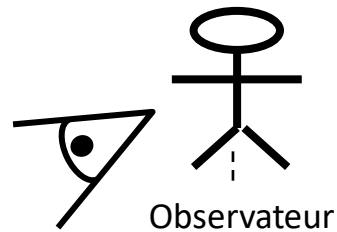
2. Les modèles de la crise

Rappel : les principes d'une démarche de modélisation

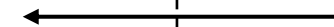
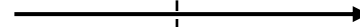
Réel



La société humaine impactée par une épidémie

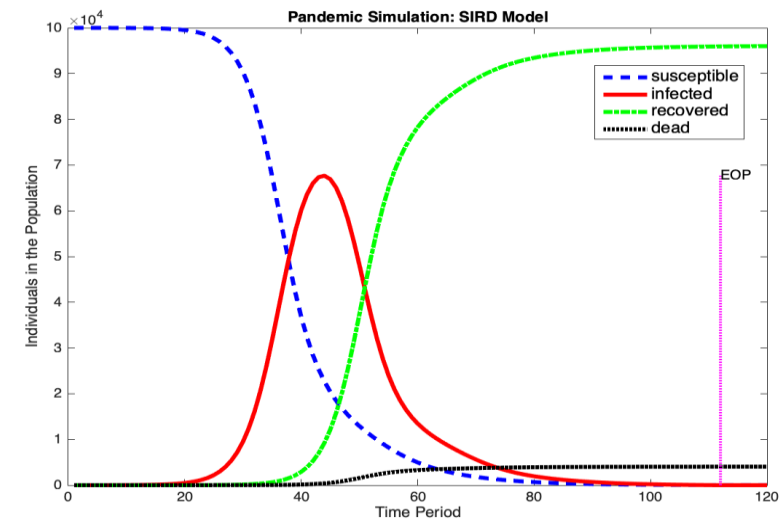


Modélisation
(simplification)



Expérimentation

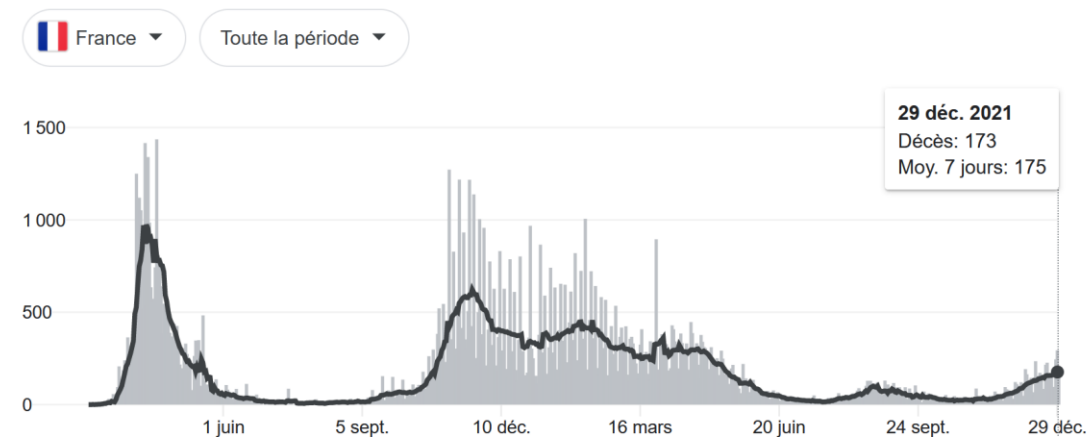
Modèle



La modélisation mathématique de l'épidémie

Rappelons que toute modélisation mathématique du réel **simplifie le réel en un modèle** que l'on doit ensuite ne pas oublier de **confronter à l'expérience** pour en garantir la fiabilité.

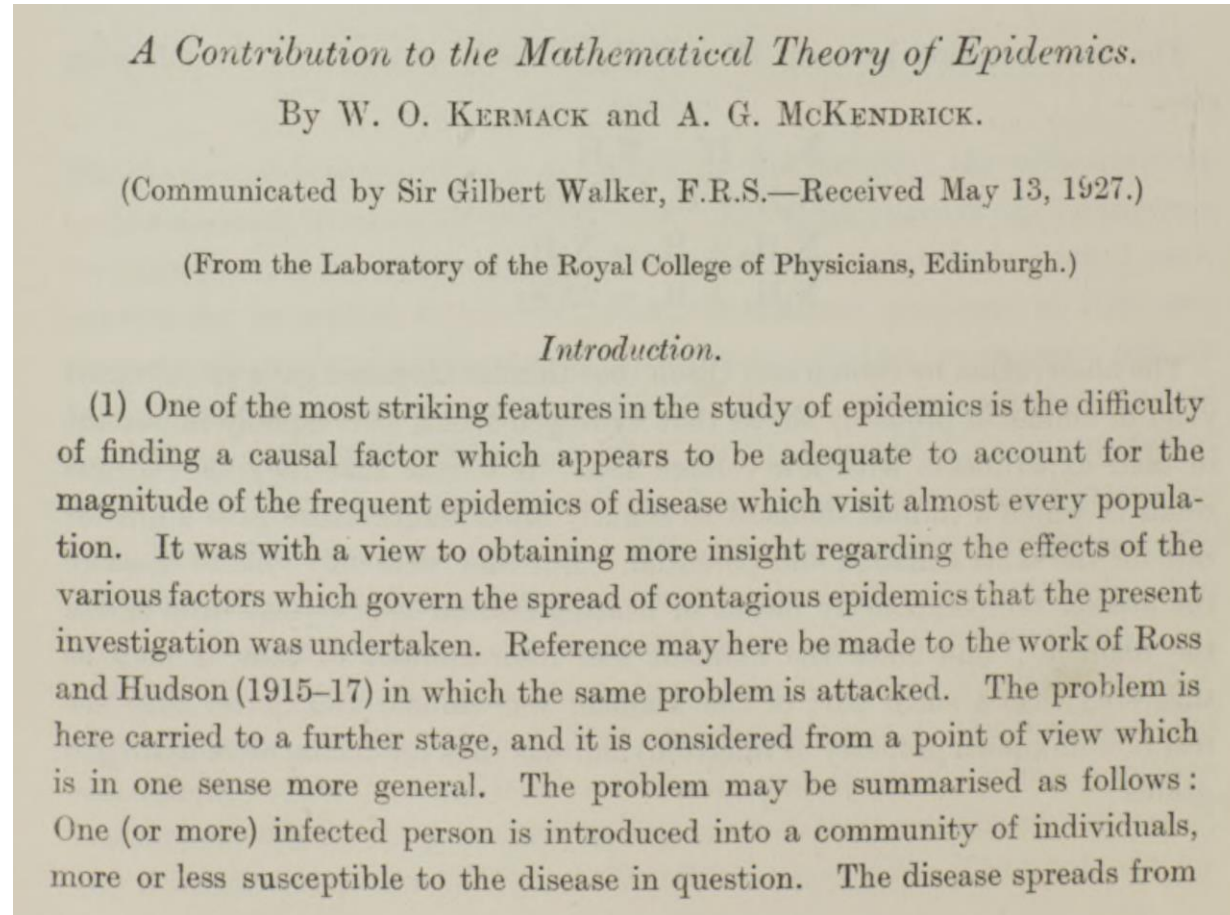
Attention : le modèle d'une épidémie n'est pas une épidémie !



Ceci n'est pas une épidémie

Nous allons maintenant parler de **modélisation d'une épidémie** et il faut bien avoir présent à l'esprit qu'**un modèle d'une épidémie n'est pas une épidémie**, mais une **abstraction mathématique** dont l'objectif est d'essayer de décrire l'évolution de certaines données épidémiologiques au cours du temps

L'origine historique de l'épidémiologie des maladies infectieuses (1/2)

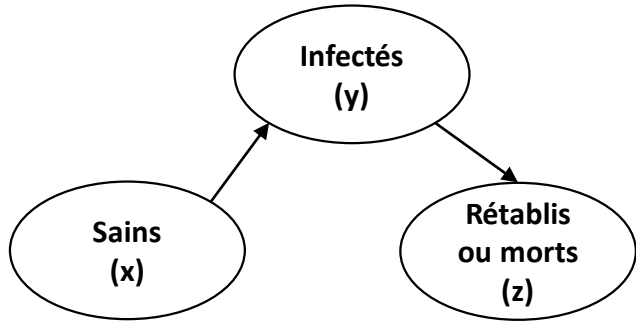


La **modélisation mathématique des épidémies** trouve ses origines dans un célèbre article de **Kermack et McKendrick** de 1927.

A Contribution to the Mathematical Theory of Epidemics.
 By W. O. KERMACK and A. G. MCKENDRICK.
 (Communicated by Sir Gilbert Walker, F.R.S.—Received May 15, 1927.)
 (From the Laboratory of the Royal College of Physicians, Edinburgh.)

Introduction.
 (1) One of the most striking features in the study of epidemics is the difficulty of finding a causal factor which appears to be adequate to account for the magnitude of the frequent epidemics of disease which visit almost every population. It was with a view to obtaining more insight regarding the effects of the various factors which govern the spread of contagious epidemics that the present investigation was undertaken. Reference may here be made to the work of Ross and Butler (1912-13) in which the same problem is attacked. The problem has been carried to a further stage, and it is considered from a point of view which is in one sense more general. The problem may be summarized as follows: One or more infected persons is introduced into a community of individuals, some or less susceptible to the disease in question. The disease spreads from

L'origine historique de l'épidémiologie des maladies infectieuses (2/2)



Modèle SIR
(histoire naturelle de l'épidémie)

Temps caché
 (la durée entre les observations est d'1 unité de temps)

| Fresh infections. | Numbers at each stage of illness. | | | | Number ill. |
|-------------------|-----------------------------------|-----------|-----------|-----------|-------------|
| v_3 | $v_{3,0}$ | $v_{3,1}$ | $v_{3,2}$ | $v_{3,3}$ | y_3 |
| v_2 | $v_{2,0}$ | $v_{2,1}$ | $v_{2,2}$ | | y_2 |
| v_1 | $v_{1,0}$ | $v_{1,1}$ | | | y_1 |
| v_0 | $v_{0,0}$ | | | | y_0 |

Modélisation discrète de l'évolution de l'épidémie

Passage à la limite non justifié (durée de 1 unité de temps $\rightarrow 0$), ce qui conduit à des équations non homogènes

$$x_t + y_t + z_t = N. \quad (11)$$

$$v_t = -\frac{dx_t}{dt}, \quad (12)$$

$$\frac{dx_t}{dt} = -x_t \left[\int_0^t A_\theta v_{t-\theta} d\theta + A_t y_0 \right], \quad (13)$$

$$\frac{dz_t}{dt} = \int_0^t C_\theta v_{t-\theta} d\theta + C_t y_0, \quad (14)$$

and from (6)

$$y_t = \int_0^t B_\theta v_{t-\theta} d\theta + B_t y_0, \quad (15)$$

where

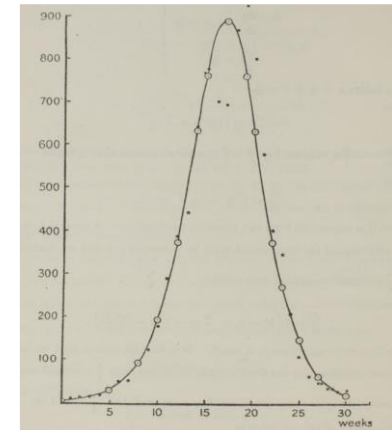
$$B_\theta = e^{-\int_0^\theta \psi(\alpha) d\alpha}, \quad A_\theta = \phi_\theta B_\theta, \quad \text{and} \quad C_\theta = \psi_\theta B_\theta.$$

Modélisation continue de l'évolution de l'épidémie

Simplification car modèle non résoluble

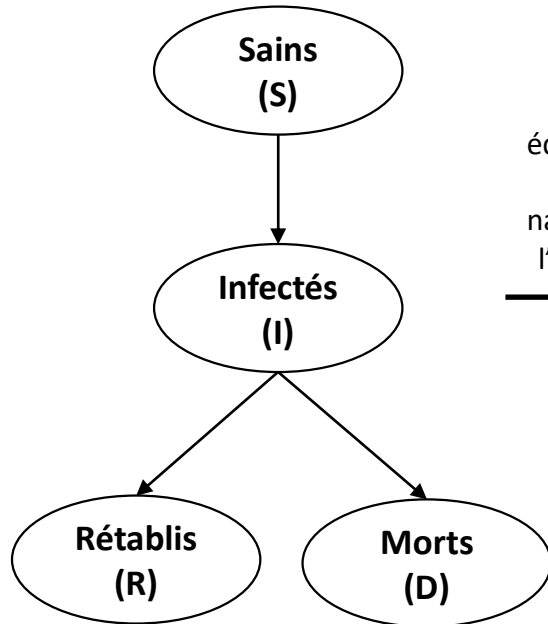
$$\left. \begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= -\kappa xy \\ \frac{dy}{dt} &= \kappa xy - ly \\ \frac{dz}{dt} &= ly \end{aligned} \right\}$$

Modélisation continue simplifiée de l'évolution de l'épidémie selon le modèle SIR (toujours d'actualité à date)



L'article de **Kermack et McKendrick** de 1927 part d'un modèle discret – qui modélise l'observation – pour créer un modèle continu – déconnecté de l'observation – qui va s'imposer comme le modèle de référence.

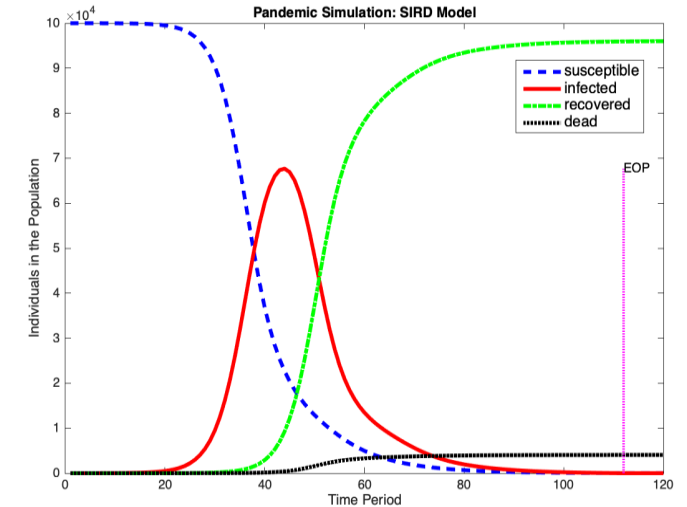
La démarche de modélisation en épidémiologie



Mise en équation de l'histoire naturelle de l'épidémie

$$\begin{aligned} dS/dt &= -k \times S \times I \\ dI/dt &= k \times S \times I - (\ell + m) \times I \\ dR/dt &= \ell \times I \\ dM/dt &= m \times I \end{aligned}$$

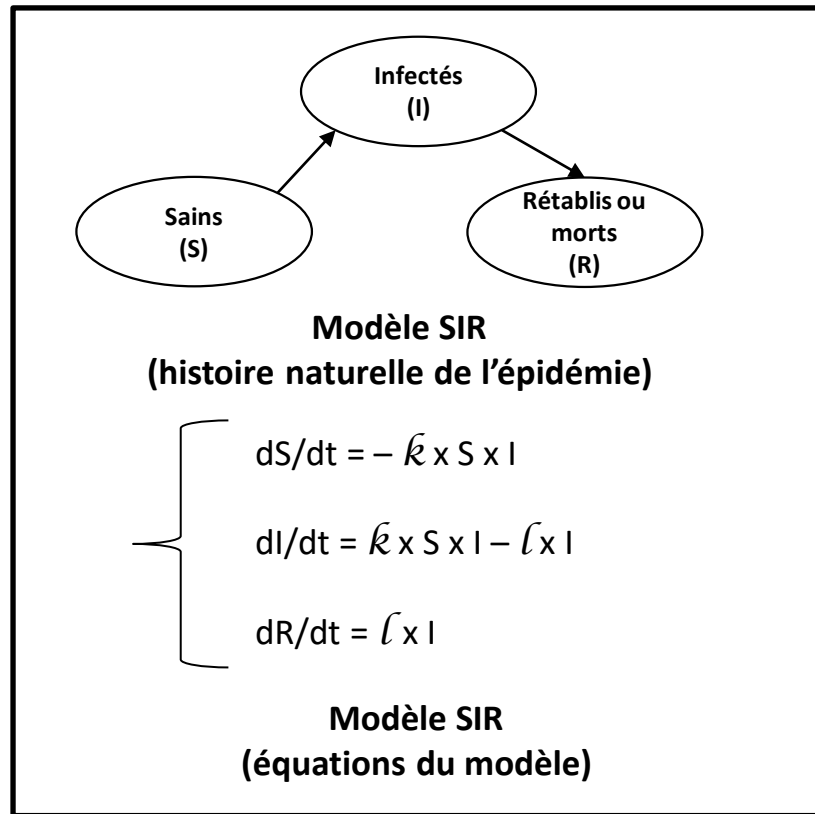
Simulation de l'évolution de l'épidémie



Exemple de démarche de modélisation épidémiologique (modèle SIRD)

L'article de **Kermack et McKendrick** de 1927 a notamment défini une **méthodologie de modélisation mathématique**, qui consiste malheureusement à « aligner » le réel sur un modèle prédéfini – choisi essentiellement parce qu'il est facile à résoudre et/ou à manipuler sur le plan mathématique – alors qu'une bonne démarche doit faire le contraire en alignant le modèle sur le réel tel qu'il est !

Le R0 et la théorie de l'immunité collective



Cadre mathématique SIR

Théorème : soit $R_0 = S(0) \times \hat{k}/\hat{l}$ (grandeur sans dimension), alors :
si $R_0 < 1$: l'épidémie-SIR ne se développe pas,
si $R_0 > 1$: l'épidémie-SIR se développe.

La valeur R_0 s'appelle le *nombre basique de reproduction* d'une épidémie-SIR et s'interprète usuellement comme étant le nombre moyen d'infections secondaires causées par une infection individuelle initiale pendant une épidémie-SIR (ce qui pose un problème immédiat d'homogénéité de cette interprétation, sachant par ailleurs que l'on trouve dans la littérature plusieurs définitions mutuellement incompatibles de cette grandeur).

Théorème de l'immunité collective : une épidémie-SIR ne peut pas se développer dans une population si la proportion de personnes immunes est strictement supérieure à $P = 1 - 1/R_0$

(exemple : si $R_0 = 5$, $P = 0.8$ et le seuil d'immunité est de 80 %)

L'article de **Kermack et McKendrick** de 1927 a aussi initié les théories des **seuils épidémiologiques** et de l'**immunité collective**, qui sont **relatives à un cadre mathématique** et donc sans valeur pratique si le cadre de modélisation est défectueux.

Les limites des modèles de type SIR en épidémiologie (1/2)

- **H1 – Patients « zéro »** : il existe, en tout début d'épidémie, un groupe d'individus qui sont déjà malades de part un processus extérieur à celui de l'épidémie considérée
- **H2 – Uniformité du mécanisme d'infection** : tous les individus de la population considérée ont la même probabilité d'être infecté
- **H3 – Immunité des infectés** : un individu infecté obtient une immunité totale
- **H4 – Non-transmission au moment de l'infection** : un individu infecté ne peut pas transmettre l'infection au moment où il est infecté
- **H5 – Mécanisme d'infection** : la **probabilité qu'un individu soit infecté** à un instant donné est **proportionnelle au produit du nombre de personnes saines et de personnes infectées**

Les **hypothèses de modélisation** que l'on trouve dans l'article de **Kermack et McKendrick** de 1927

L'hypothèse H5 est très structurante et donne le **terme quadratique** dans les équations de type SIR

$$\begin{aligned}dS/dt &= -\boxed{k \times S \times I} \\dI/dt &= \boxed{k \times S \times I} - \ell \times I \\dR/dt &= \ell \times I\end{aligned}$$

L'hypothèse H5 traduit le fait qu'une personne saine peut – **avec la même probabilité** – rencontrer **toute** personne infectée et être infectée par cette dernière.

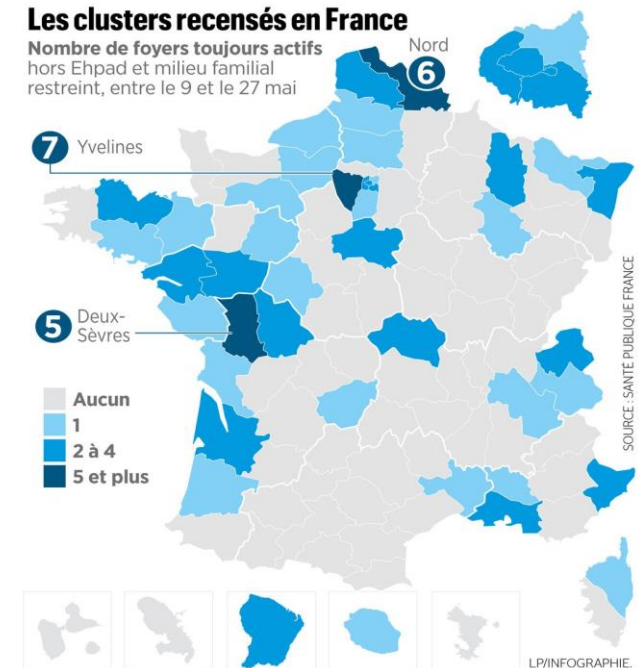
Malheureusement cette dernière hypothèse est clairement **fausse pour de grandes populations**, ce qui limite le domaine d'application des modèles de type SIR à des **populations de petite taille**.

Les limites des modèles de type SIR en épidémiologie (2/2)

- La géographie du périmètre de propagation d'une épidémie
- La sociologie du périmètre de propagation d'une épidémie
- Les mécanismes indirects d'infection (par exemple par surfaces inertes ou par voie oro-fécale)
- Les niveaux de protection naturelle offerts par le système immunitaire humain
- Les mutations potentielles d'un virus infectieux donné qui font qu'une épidémie peut changer de nature au fur et à mesure qu'elle évolue
- Les impacts sociétaux d'une épidémie

Les caractéristiques d'une épidémie qui ne sont pas prises en compte en modélisation épidémiologique classique « à la SIR »

La **modélisation mathématique en épidémiologie des maladies infectieuses** reste **simpliste d'un point de vue systémique** car elle n'analyse pas tous les phénomènes constitutifs d'une épidémie, mais uniquement les données sanitaires de base (nombre de personnes infectées, nombre d'hospitalisations, nombre de morts, etc.) liées à une épidémie.

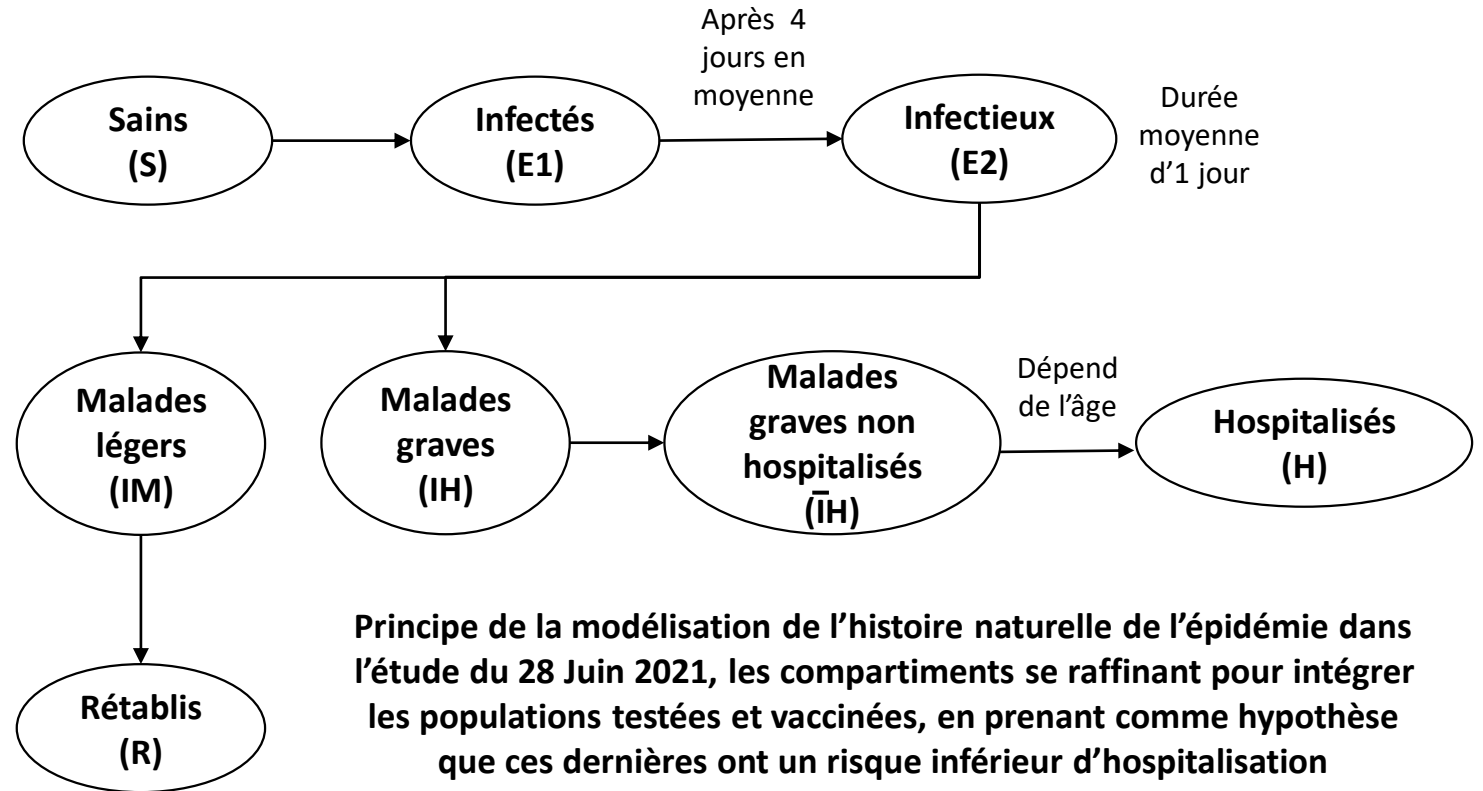


La distribution fractale d'une épidémie dans l'espace ne peut pas être capturée par un modèle « à la SIR »

Un cas d'école : l'étude de l'institut Pasteur du 28 Juin 2021

| | |
|-----------|-----------|
| 0-9 ans | 10-17 ans |
| 18-29 ans | 30-39 ans |
| 40-44 ans | 45-49 ans |
| 50-54 ans | 55-59 ans |
| 60-64 ans | 65-69 ans |
| 70-74 ans | 75-79 ans |
| ≥ 80 ans | |

La stratification de la population par âge utilisé dans l'étude du 28 Juin 2021



Le **modèle mathématique épidémiologique** utilisé dans l'étude de l'Institut Pasteur du 28 Juin 2021 est un **modèle de type SIR appliqué à l'échelle de la France**, ce qui le rend intrinsèquement irréaliste à notre sens.



Agenda

1. La crise des modèles

2. Les modèles de la crise

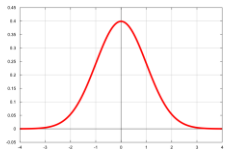
Les caractéristiques de la crise du covid-19



La crise du covid-19 est une **crise globale** qui affecte l'ensemble des systèmes constitutifs de la société humaine et pas simplement une crise purement sanitaire.



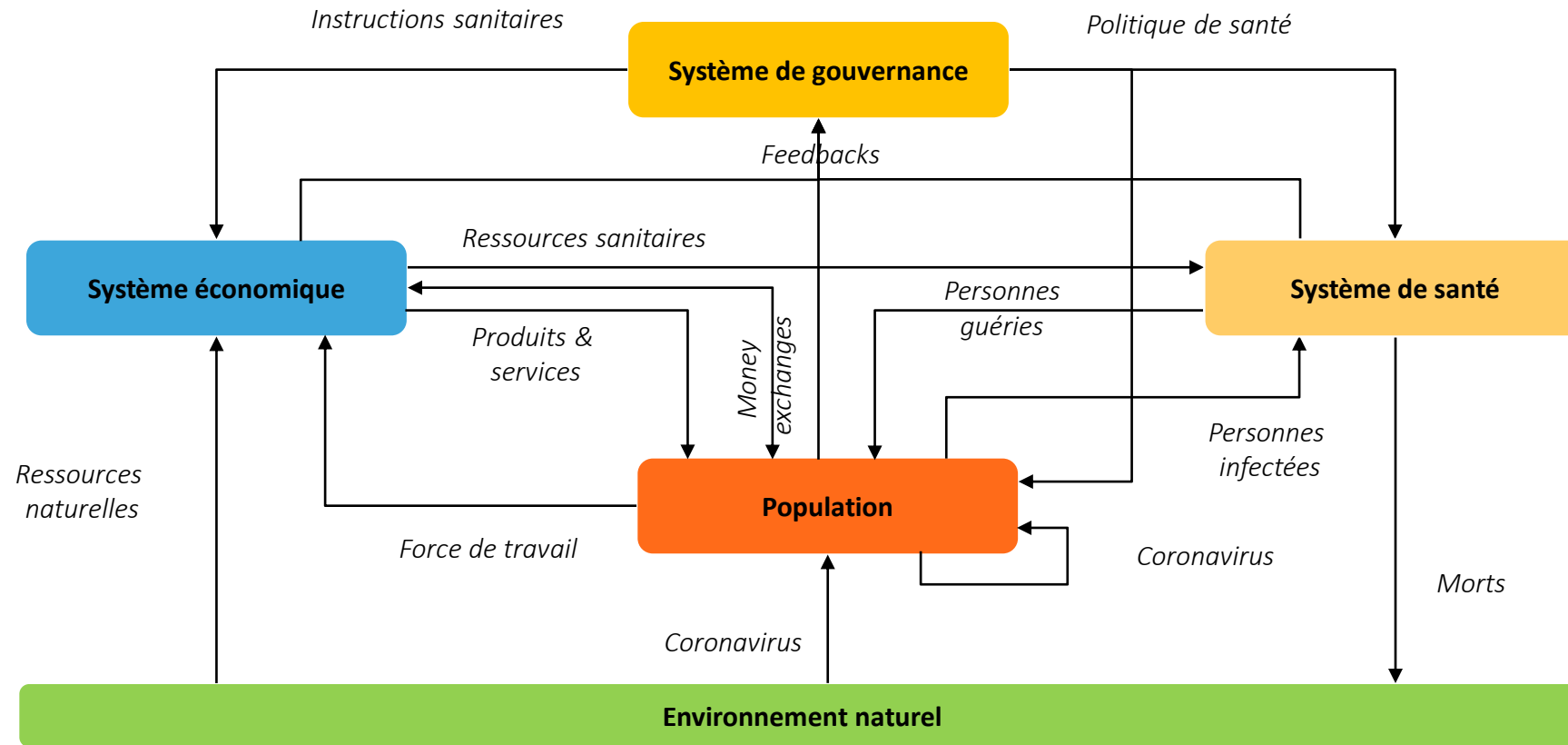
L'épidémie du covid-19 met en jeu des **temporalités complexes** : délais d'incubation de l'épidémie, latence des actions de mitigation, impacts à long terme difficiles à prévoir



L'épidémie du covid-19 est enfin caractérisée par l'**incertitude** : données trop nombreuses, difficultés d'interprétation, difficulté à identifier les impacts économiques & sociétaux

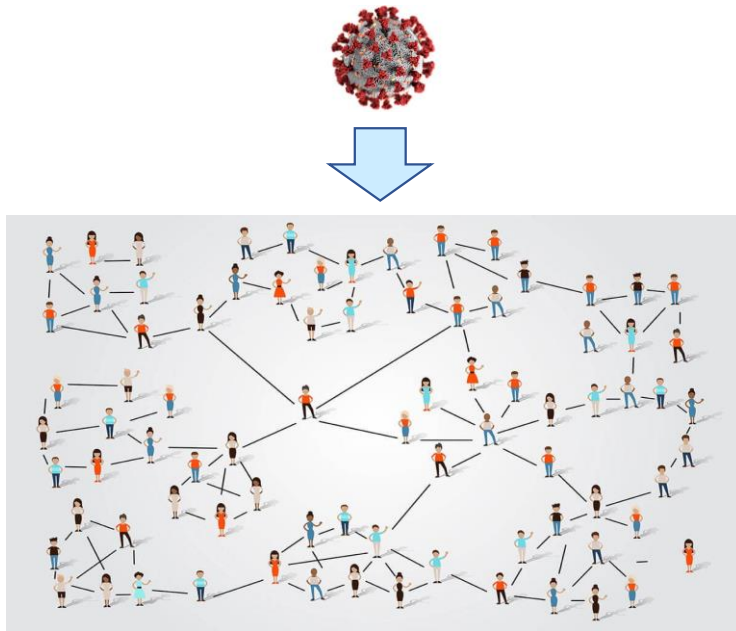
Le problème est donc de **mitiger de manière optimale les effets à court & long terme de la crise du covid-19** en tenant compte des **latences** et des **incertitudes** de cette crise, ce qu'on peut voir comme un **problème de contrôle optimal**

Le point clef : repenser une épidémie dans une logique systémique

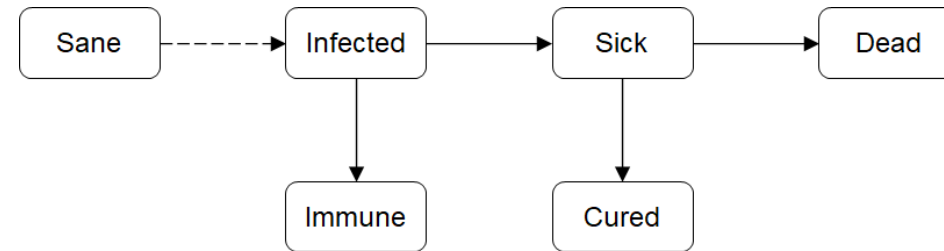


Le point clef est ainsi de **repenser une épidémie dans une logique systémique** en intégrant **tous les systèmes impactés** par l'épidémie car on n'optimise jamais globalement un système en ne considérant qu'une seule dimension

Ingrédient 1: une modélisation épidémiologique réaliste (1/3)



Modélisation de l'épidémie par percolation d'un virus dans une population modélisée comme un réseau social où une personne ne peut infecter qu'une personne voisine



L'automate stochastique utilisé dans notre approche par percolation, les probabilités de transition ayant été identifiées aux valeurs pragmatiques données dans la littérature

Une **modélisation plus réaliste** peut se faire en considérant une épidémie comme un phénomène de **percolation d'un virus dans un réseau social**, modélisé classiquement comme un graphe aléatoire simulé avec une technique due à Barabasi-Albert. Cette approche se trouve dans la littérature en épidémiologie, sans cependant être utilisée en pratique.

Ingrédient 1: une modélisation épidémiologique réaliste (2/3)

| ρ | | π | ν | | π | ν |
|--------------|--|----------------|-------|--|-----------------------|-------|
| 0.005 | | $\pi < 0.1 \%$ | 998 | | $1.7 \% < \pi < 2 \%$ | 2 |
| 0.010 | | $\pi < 0.1 \%$ | 983 | | $21 \% < \pi < 23 \%$ | 17 |
| 0.015 | | $\pi < 0.1 \%$ | 959 | | $43 \% < \pi < 47 \%$ | 41 |
| 0.020 | | $\pi < 0.1 \%$ | 945 | | $58 \% < \pi < 62 \%$ | 55 |
| 0.025 | | $\pi < 0.1\%$ | 908 | | $70 \% < \pi < 74 \%$ | 92 |

Proportion π de la population qui est infectée, pour différentes valeurs de la probabilité de propagation ρ . La valeur ν montre le nombre de simulations (sur 1000) qui conduisent à un certain seuil d'infection de la population

L'**approche par percolation** conduit à des **résultats totalement différents** des « modèles » classiques de l'épidémiologie mathématique : la propagation épidémique dans l'ensemble d'une population reste en effet ici un **phénomène extrêmement rare**, ce qui rend bien compte du caractère fractal d'une épidémie dans l'espace, au contraire des modèles de type SIR où – par construction – tout le monde finit par être touché par une épidémie

Ingrédient 1: une modélisation épidémiologique réaliste (3/3)

Taux de létalité

| $\tau \backslash \gamma$ | 0 | 30 | 60 | 90 | 120 | ∞ |
|--------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|----------|
| 0.01 % | 2.10 % | 1.32 % | 1.13 % | 1.08 % | 1.02 % | 0.98 % |
| 0.05 % | 2.10 % | 1.42 % | 1.35 % | 1.36 % | 1.35 % | 1.35 % |

Durée de l'épidémie

| $\tau \backslash \gamma$ | 0 | 30 | 60 | 90 | 120 | ∞ |
|--------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|----------|
| 0.01 % | 243 | 407 | 539 | 361 | 220 | 195 |
| 0.05 % | 243 | 322 | 247 | 192 | 189 | 188 |

Simulation d'une population confinées avec deux proportions τ de personnes malades pendant durée initiale de 15 jours avant que l'épidémie ne soit observable pour différentes durées γ de confinement (en jours).

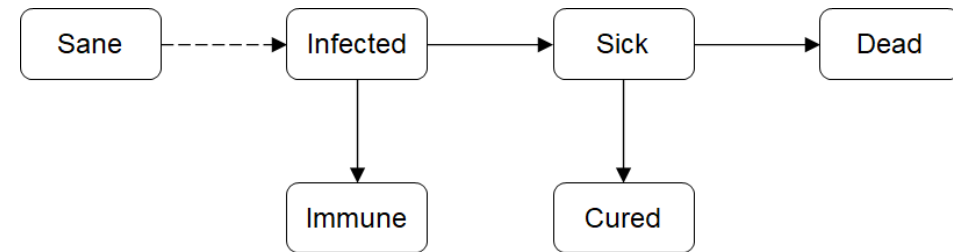
On constate bien l'efficacité d'un confinement, mais également la nécessité d'un confinement long (de l'ordre de 4 mois) si on veut éviter un rebond significatif de l'épidémie suite à l'arrêt du confinement.

On peut également utiliser cette approche pour **simuler les effets d'un confinement**. L'efficacité du confinement a été capturée par un paramètre $0 < e < 1$ qui modélise la **réduction de la capacité des liens sociaux à transmettre la maladie**. A chaque étape de la simulation, correspondant à une journée, la probabilité d'un individu d'infecter un individu voisin est alors de $(1-e) \times p$ où p est la probabilité « naturelle » de contamination. Nous avons pris $e = 2/3$ dans nos simulations.

Ingrédient 2: l'intégration des conséquences économiques (1/2)

- *Travail perdu* = valeur des heures de travail perdues pour les personnes infectées + valeur des heures non travaillées pendant un confinement (cout horaire moyen : 28 \$)
- *Impact économique global* = Travail perdu + cout standardisé des pertes de vies humaines suite à l'épidémie (valeur standardisée d'une vie : 1 M\$)
- Les effets économiques à long terme ne sont pas pris en compte

Nos hypothèses de modélisation économique



L'automate stochastique utilisé à nouveau dans notre approche pour simuler la propagation de l'épidémie, les probabilités de transition ayant été identifiées aux valeurs pragmatiques données dans la littérature

Les principes de notre **modélisation des impacts économiques** de la crise du covid-19

Ingrédient 2: l'intégration des conséquences économiques (2/2)

Caractéristiques des scénarios étudiés

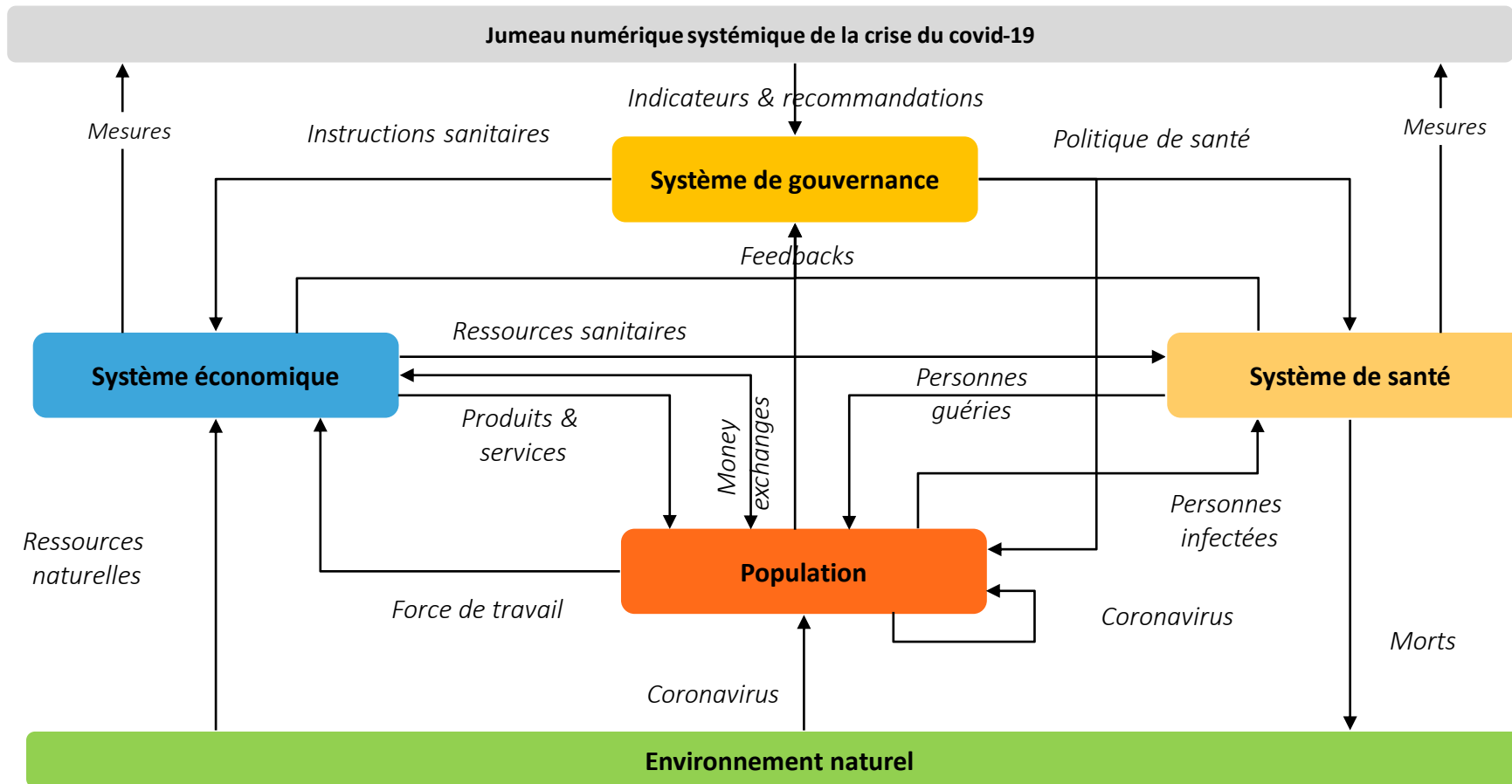
Résultats de simulation

| Scenario N = 10 ⁵ | n | ρ % | τ % | ε | δ days | γ days | T days | Total deaths | Lost work \$M | Total damages \$B |
|---------------------------------|----|----------|----------|---------------|---------------|---------------|--------|--------------|------------------|----------------------|
| 0 | 10 | 2.5 | 100 | 0 | 0 | 0 | 112 | 4060 | 312 | 4.38 |
| 1 | 10 | 2.5 | 0.01 | 0.66 | 20 | 30 | 179 | 4080 | 852 | 4.93 |
| 2 | 10 | 2.5 | 0.1 | 0.66 | 10 | 30 | 309 | 3989 | 950 | 4.95 |
| 3 | 10 | 1.5 | 0.05 | 0.66 | 20 | 60 | 286 | 3994 | 2106 | 6.1 |
| 4 | 10 | 2.5 | 0.05 | 0.8 | 5 | 30 | 334 | 3975 | 954 | 4.94 |
| 5 | 10 | 2.5 | 0.05 | 0.835 | 5 | 30 | 223 | 524 | 696 | 1.22 |
| 6 | 10 | 2.5 | 0.05 | 0.85 | 5 | 30 | 114 | 160 | 675 | 0.86 |
| 7 | 10 | 2.5 | 0.05 | 0.9 | 5 | 30 | 61 | 66 | 672 | 0.74 |
| 8 | 10 | 2.5 | 0.05 | 0.835 | 10 | 30 | 366 | 2904 | 858 | 3.76 |
| 9 | 10 | 2.5 | 0.05 | 0.835 | 15 | 30 | 312 | 3284 | 858 | 4.14 |
| 10 | 10 | 2.5 | 0.05 | 0.835 | 20 | 30 | 261 | 3505 | 806 | 4.31 |
| 11 | 5 | 2.5 | 0.05 | 0.835 | 20 | 30 | 88 | 190 | 674 | 0.86 |
| 12 | 5 | 1.25 | 10 | 0.835 | 20 | 30 | 201 | 1959 | 766 | 2.73 |

Scénario de base : ne rien faire

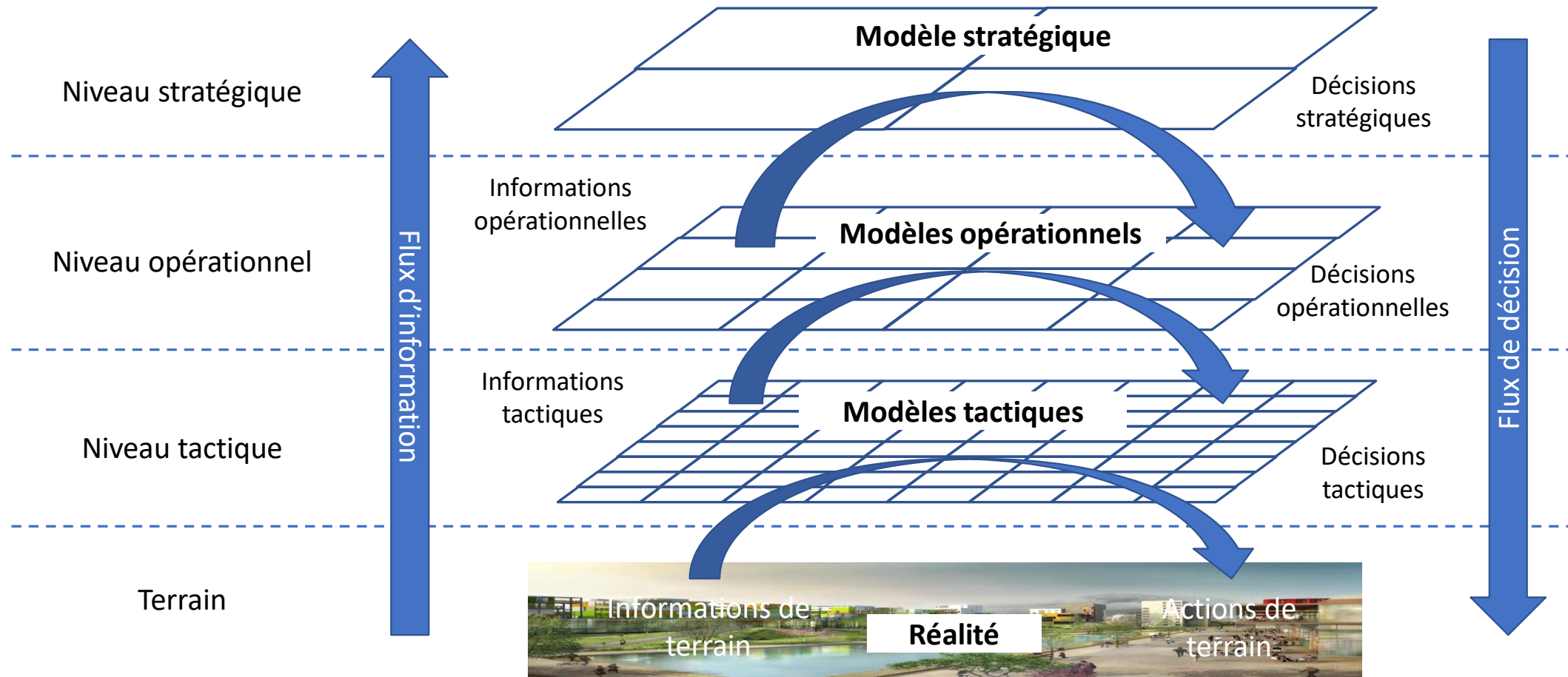
Scénarios d'analyse des impacts économiques de la crise du covid-19 dans une population de N milliers de personnes. Les paramètres sont les suivants : n est le nombre moyen de contacts quotidiens par personne, ρ est la probabilité qu'une personne en infecte une autre pendant une journée, τ est la fraction de la population qui n'est pas soumise à un confinement strict, ε est la fraction de la population qui respecte le confinement, δ est le délai nécessaire pour mettre en place un confinement, γ est la durée d'un confinement, T est la durée de l'épidémie

Vers un jumeau numérique systémique de la crise du covid-19 (1/2)



Ces modèles pourraient utilement être intégrés dans un **jumeau numérique systémique de la crise du covid-19**

Vers un jumeau numérique systémique de la crise du covid-19 (2/2)



Un tel **jumeau numérique systémique** aurait vocation à être organisé de façon similaire aux **systèmes de contrôle-commande-communication** utilisés classiquement dans le domaine de la défense.

Merci pour vos questions



Contact

Daniel KROB – Président

Email : daniel.krob@cesames.net

Tél : + 33 (0)6 60 42 34 49

Cesames Institut

SAS au capital de 1,070,000 €

Siège social : 10, rue de Penthièvre – 75008 Paris – France

