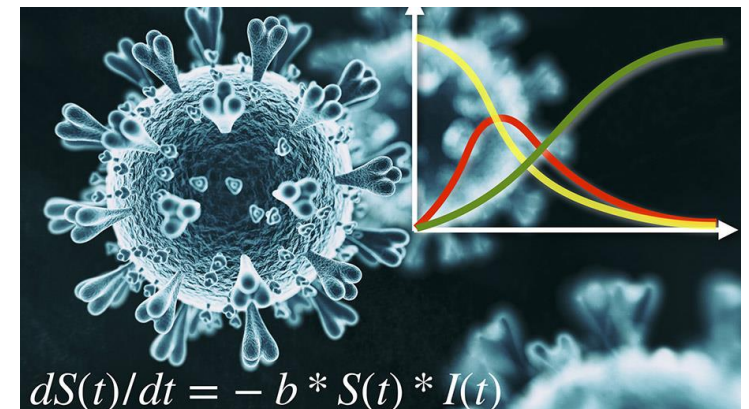


Modélisation et COVID 19 : espoirs et limites

- Quelle utilité pour l'épidémiologie ?
- Modélisation: démarches diverses
- La « physique classique » de l'épidémiologie
- Les outils « modernes »: réseaux, SMA, IA
- Le traçage



Commentaire vue1

- Les derniers mois ont été très prolifiques en publications portant sur les outils de modélisation pour gérer la pandémie du COVID 19.
- Il s'agit ici de tenter d'apporter notre vision de « complexologues ».
- Notre analyse se limitera aux **aspects macroscopiques et collectifs** de la pandémie sans traiter des domaines biologiques, certainement les plus complexes, et dont les résultats font partie des entrées de base pour les modélisations de propagation dont il est question ici.

Utilité de la modélisation en épidémiologie

Comprendre

Paramètres de base, R_0 , etc.

Prévoir

Stratégie de lutte, planification

Agir

Confinement, outils barrière

Concevoir

Outils de traçage

Février Juin

Commentaire vue2

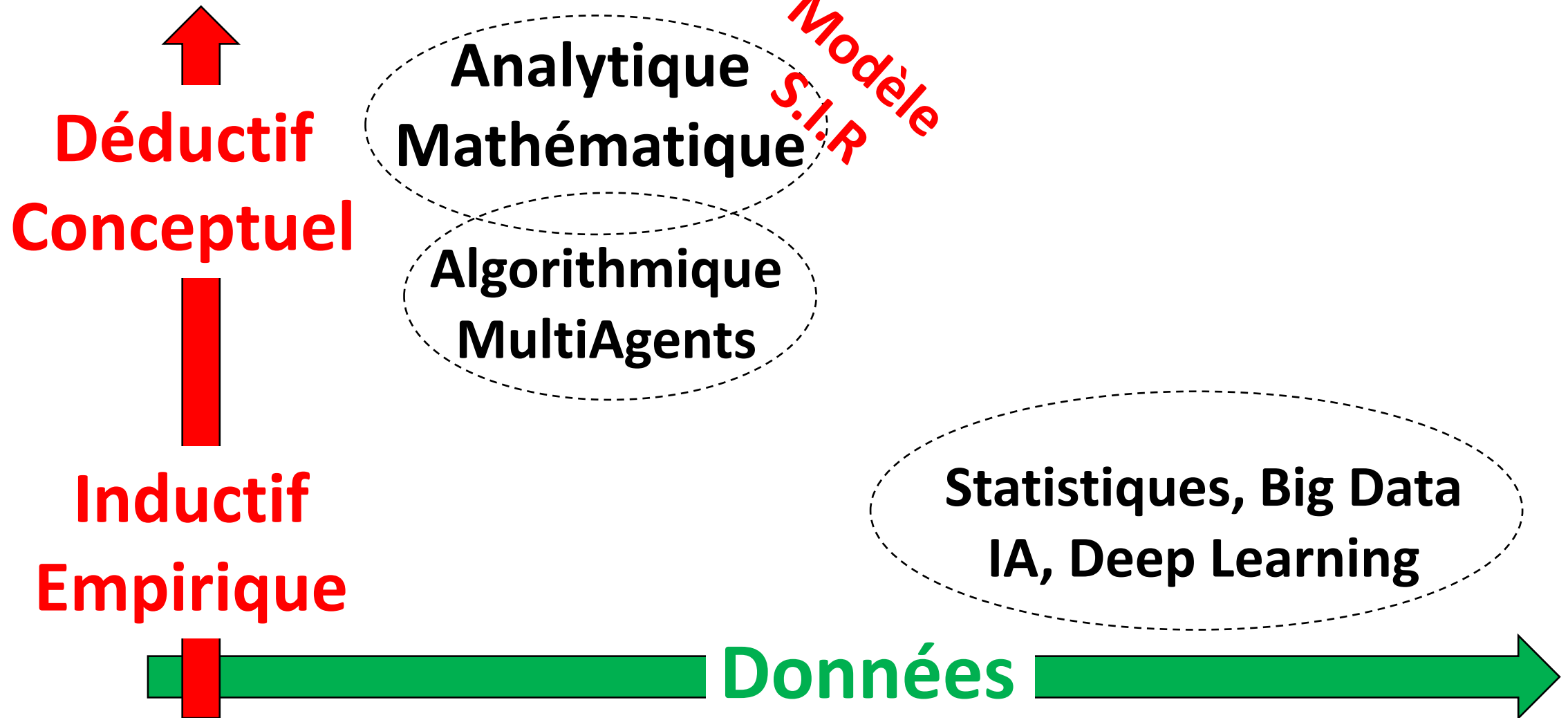
La modélisation a joué un rôle fondamental dans les diverses phases de l'épidémie COVI19, avec un apprentissage progressif.

Selon notre grille d'analyse, la modélisation intervient dans les diverses phases du cycle de vie d'une pandémie (considéré comme système complexe dynamique) et doit permettre :

1. La compréhension du phénomène et la découverte d'éventuelles lois et paramètres de base comme le taux de contagiosité R_0
2. Les prévisions d'évolution du phénomène: essentielles pour **décider entre confinement et immunisation collective**
3. La définition des outils d'action et l'évaluation de leur efficacité
4. La conception d'outils spécifiques comme le traçage

Les usages et « clients » des modélisation diffèrent selon les diverses phases d'une épidémie.

Modélisation et Simulation: démarches diverses



Commentaire vue3

Il ne s'agit pas ici d'entrer dans les détails techniques mais de rappeler que la modélisation a de tous temps suivi deux démarches complémentaires :

Une démarche déductive et conceptuelle conduisant à un modèle théorique mathématisable.

Souvent les systèmes complexes ne peuvent être traités avec cette approche et la simulation algorithmique de modèles multi-agents se révèle utile même avec peu de données.

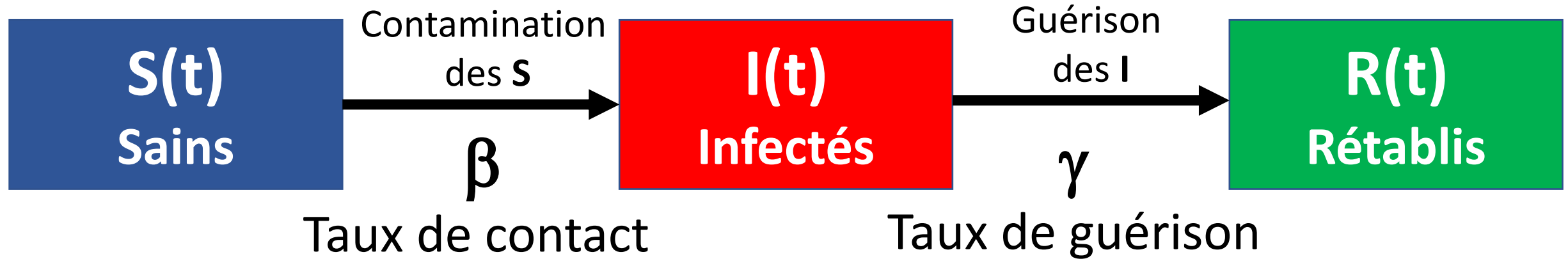
Une démarche plus empirique consistant à ajuster des modèles en exploitant des données (lorsque disponibles)

Ce fut déjà le cas de Kepler exploitant les données massives de Tycho Brahé pour ajuster ses trois lois et Newton inventant sa théorie explicative.

Les techniques dites d'IA procèdent de la deuxième catégorie mais ne sont efficaces qu'à condition de disposer de données massives ce qui n'était pas le cas surtout au début du développement de l'épidémie.

De ce fait les prévisions les moins incertaines ont utilisé une modélisation conceptuelle dont le principe a été inventé il y a près de 100 ans, le modèle SIR

La « physique classique » de l'épidémiologie: le modèle compartimental de base **S.I.R.** (Kermack et McKendrick, 1927)



Le modèle dynamique **S.I.R** est du type compartimental et utilise peu de données: contagiosité et durées (incubation, rétablissement, immunisation)

Le modèle **S.I.R** permet d'estimer le **taux de reproduction R**

$$\begin{aligned}\frac{dS}{dt} &= -\beta \frac{SI}{N} \\ \frac{dI}{dt} &= \beta \frac{SI}{N} - \gamma I \\ \frac{dR}{dt} &= \gamma I \\ N &= S + I + R\end{aligned}$$

Commentaire vue 4

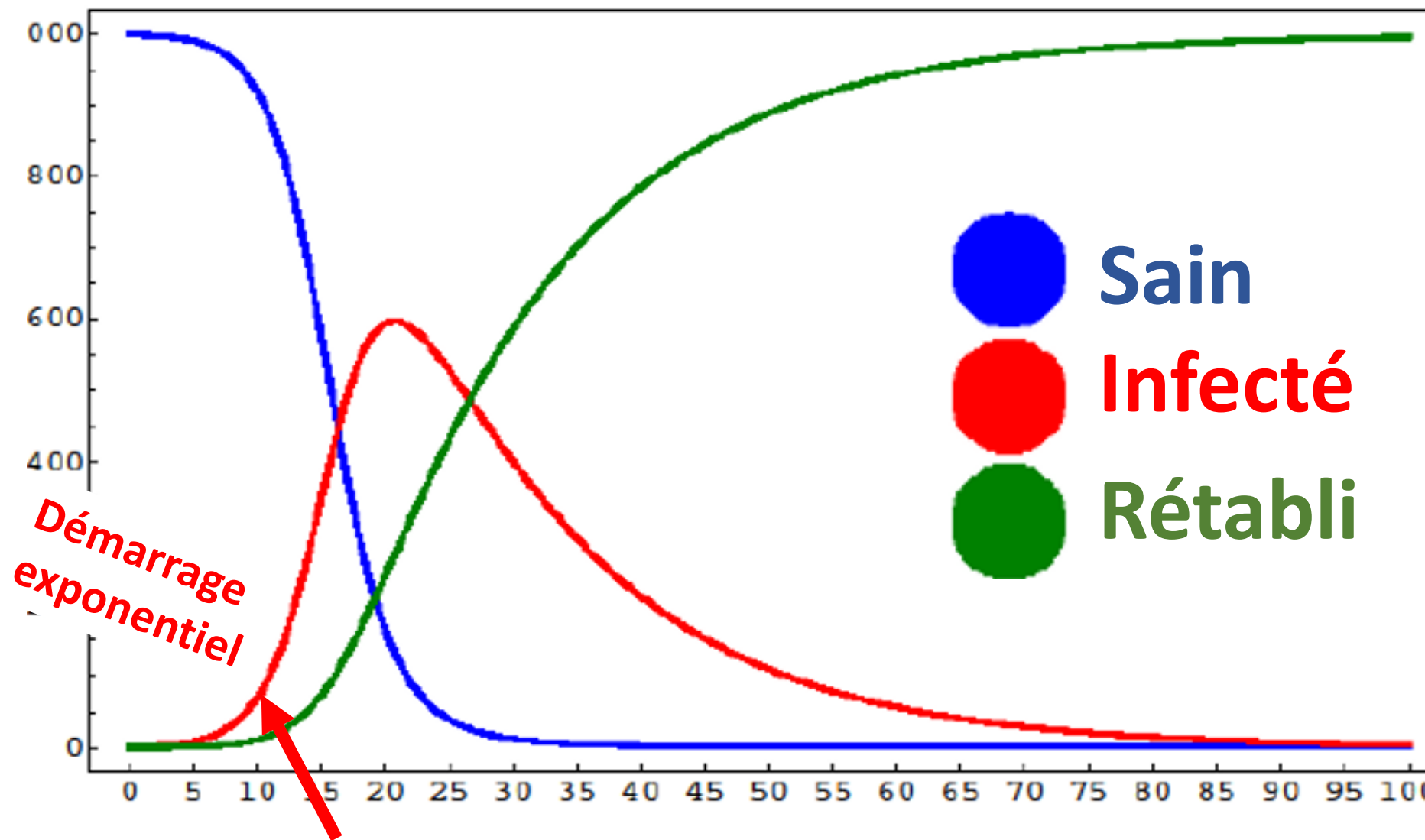
Un premier principe identifié fut celui du **taux initial de reproduction R_0** avec le phénomène de seuil de propagation pouvant, si supérieur à 1, déclencher un **démarrage exponentiel** de l'épidémie avec un phénomène de type réaction en chaîne.

Le modèle SIR a été inventé en 1927 par deux médecins de l'empire britannique pour la peste bubonique à Bombay. Il est à l'origine des mathématiques épidémiques.

C'est un **modèle dynamique** (évoluant dans le temps) et **qui applique le concept du compartimentage**: la population est répartie en plusieurs compartiments d'états : **S** (sains), **I** (infectés), **R** (rétablis), avec des probabilités de transition entre compartiments.

Ce modèle se traduit par des équations différentielles calculables par simulation.

Profil S.I.R typique d'une épidémie selon S.I.R.



R_0 du COVID 19: entre 2,5 et 3

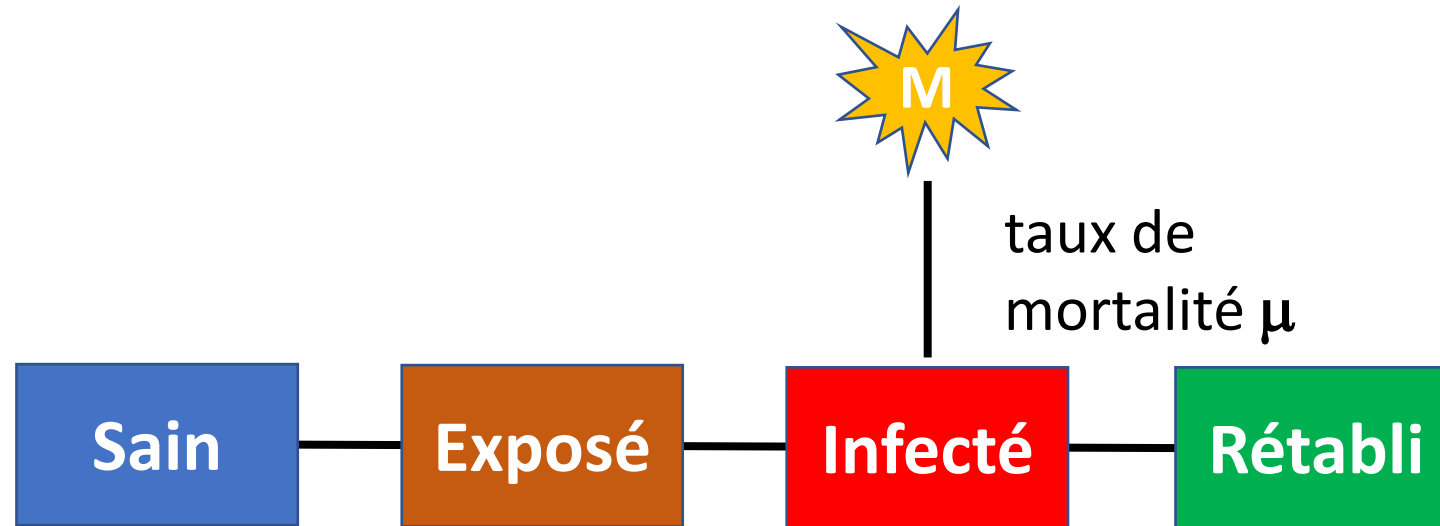
Commentaire vue 5

Les simulations du modèle permettent d'évaluer divers scénarios d'évolution, avec évidemment toutes les incertitudes sur les données de base.

Le graphique ci-dessus est un profil typique d'un résultat du modèle **S.I.R** sans action pour diminuer le R_0 :

1. Le démarrage exponentiel du nombre d'infectés avec le taux R_0 est progressivement freiné par la diminution du « **stock** » d'individus sains passés dans la case infectés puis rétablis.
2. La forme de la courbe rouge traduit un phénomène **d'immunisation collective**.

Extensions du Modèle compartimental



- Le modèle S.I.R. a eu des extensions telles que la case « **Exposé** » ou « **M** » avec le **taux de mortalité μ** (modèle **S.E.I.R.**)
- Le modèle a été « calé » au fur et à mesure des données disponibles
- Malgré sa rusticité, il a été l'outil principal de prévision identifié au début de l'épidémie (voir par exemple la note de **l'Office Parlementaire** de C. Villani)

Commentaire vue 6

Une retombée directe du modèle **S.I.R.** est l'identification des composants du **facteur R**, essentielle pour bien identifier les leviers d'action.

R est proportionnel à **C, P, et D** identifiés dans le modèle S.I.R.

Comme l'indique le schéma, D est une donnée biologique.

On peut agir sur les 2 facteurs pour diminuer le coefficient R en dessous de 1

- C nombre de contacts (par jour)
- P « efficacité » d'un contact.

Masques, tests (nasal et virologique) sont des outils essentiels pour diminuer P.

Les conséquences des retards de disponibilité en France de ces divers outils seraient à être évaluées.

Agir sur R, dépendant de $D \times P \times C$

$D = 1/\gamma$ du
modèle SIR

D

Durée moyenne de
contagiosité

Donnée de base à identifier
(propre à l'agent infectant)

P

Probabilité que lors d'un
contact, un Infecté
contamine un Sain

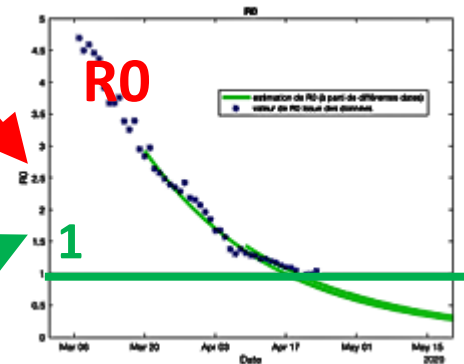
Mesures Barrière:

- Masques
- Hygiène
- Distance « sociale »

C

Nombre de contacts par jour
pouvant infecter

- Confinement
- Chasse aux « clusters »
- Tests
- Traçage



Evolution de R

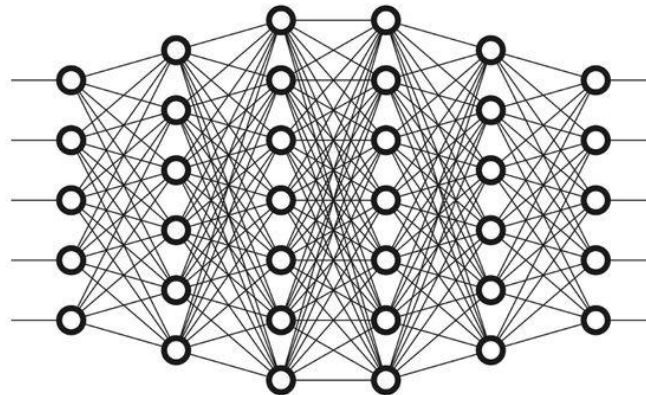
Commentaire vue 7

- Le modèle S.I.R. a eu des extensions telles que la case « **Exposé** » ou « **M** » avec le **taux de mortalité** μ (modèle **S.E.I.R.**)
- Le modèle a été « calé » au fur et à mesure des données disponibles
- Malgré sa rusticité, il a été l'outil principal de prévision identifié au début de l'épidémie (voir par exemple la note de **l'Office Parlementaire** de C. Villani)

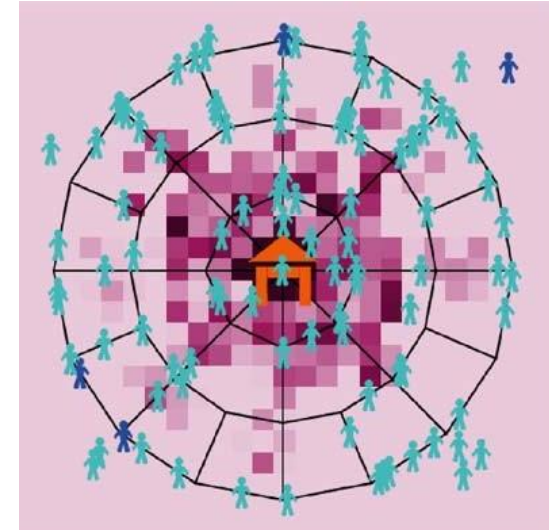
Outils « modernes » de modélisation



Réseaux complexes



IA et Réseaux neuronaux



**Automates cellulaires
(Simulation Multi Agents)**

Commentaire vue 8

Bien d'autres outils de modélisation sont théoriquement applicables avec des résultats divers.

En premier lieu, les modèles de **réseaux complexes** s'appliquent : rôle des points de connexion et clusters, mécanismes de propagation et de routage.

L'analyse des données fournies par les opérateurs de télécom mobiles (**15 milliards de fadettes** par jour) avec de puissants outils d'extraction de big data permettent de bien connaître les mouvements de foules, détecter les concentrations, tenter de remonter aux **patients zéro**. Une coopération entre Orange et l'INSERM a été exploitée.

Les outils de modélisation multi agents (SMA) sont également cités. Pas mal de potentialités mais peu de résultats concrets sinon sur des modèles de propagation locale.

De même, beaucoup de projets qualifiés d'**IA** sont cités dans la littérature scientifique et beaucoup d'initiatives ont été annoncées. En fait les outils d'IA (en dehors de la fouille de données) sont surtout utilisés en biologie : aides au diagnostic, imagerie médicale, recherche génétique. Par contre le caractère prédictif de l'IA n'était pas pertinent pour les prévisions d'épidémiologie, faute de données antérieures.

Les outils de traçage

- **Numériques autoritaires:** surveillance par **GPS** et confinement style « bracelet électronique »
- **Brigades de traçage COVID**
- **Numériques anonymisés** avec détection de proximité par **Bluetooth:**

A. DP-3T, solution Apple et Google, sans serveur central

B. ROBERT, solution **STOPCOVID**, avec serveur central



Approuvé
le 27/5

- **Précision Bluetooth ?**
- **Seuil d'efficacité: 50%, 70% ?**

Commentaire vue 9

La modélisation a également contribué à définir des systèmes de traçage devant permettre de détecter les infectés et de diminuer leurs contacts.

Plusieurs options envisageables:

- Les méthodes intrusives, centralisées et autoritaires par GPS et/ou données téléphoniques: incompatibles avec la protection des libertés individuelles: électronique.
- Les méthodes manuelles via les brigades de traçage à partir des remontées d'informations médicales
- Les outils de détection de contacts de proximité par Bluetooth permettant de détecter les contacts avec un infecté, et de remonter à leurs contacts antérieurs

Le débat du 27 mai en France en a autorisé le lancement (application STOPCOVID téléchargeable depuis le 2/6 sur IOS et Android)

L'efficacité sera fonction du « **quorum** » de personnes acceptant d'utiliser les système, conséquence de plusieurs facteurs cumulés. (selon certaines études, **doit être supérieur à 70%**). Ce qui fonctionne à Taiwan ou Singapour n'est pas nécessairement transposable en France. Pas d'information d'efficacité à ce jour.

En conclusion, la modélisation qui est totalement nécessaire a des résultats en probabilité :

- Le « **portrait du virus** » est encore flou (temps de contagiosité, certitude de l'immunisation, etc.)
 - Un facteur d'incertitude non modélisable concerne les réactions des intéressés aux divers outils et mesures plus ou moins autoritaires (effet **Facteurs Humains**)
 - Mais elle est le seul outil permettant de **diminuer l'incertitude des décisions** (par exemple processus de déconfinement) et d'identifier l'effet des diverses mesures destinées à **diminuer** le taux de reproduction R .
- « ce qui est simple est faux, ce qui est complexe est inutilisable »**

Quelques références

- *OFFICE PARLEMENTAIRE D'ÉVALUATION DES CHOIX SCIENTIFIQUES ET TECHNOLOGIQUES: Épidémie de COVID-19 – Point sur la modélisation épidémiologique pour estimer l'ampleur et le devenir de l'épidémie de COVID-19 (30 avril 2020)*
- Mobile phone data for informing public health actions across the COVID-19 pandemic lifecycle (Science Advances Publish Ahead of Print, published on April 27, 2020 as doi:10.1126/sciadv.abc0764
- <https://interstices.info/modeliser-la-propagation-dune-epidemie/>
- https://fr.wikipedia.org/wiki/Mod%C3%A8les_compartimentaux_en_%C3%A9pid%C3%A9miologie

Commentaires du diaporama