

Zoom Café du 20/4/20

A propos du Corona Virus: les outils de modélisation

Modélisation des épidémies

- Vous dites modèles ?
- Les divers outils possibles
- Le modèle compartimental
- Efficacité et limites
- Comparaisons internationales
- Annexe: outils de traçage

Modèles / Simulation – Quelques rappels

- Un modèle est une représentation limitée et simplifiée de la réalité; un modèle n'est pas cette réalité !
- Ne pas confondre corrélation et causalité
- «La carte n'est pas le territoire »
- Tous les modèles sont faux, certains sont utiles:
 - Simuler pour **comprendre**
 - Comprendre **pour agir mieux**

Historique des modèles d'épidémies

- **1760, Daniel Bernoulli** : Essai d'une nouvelle analyse de la mortalité causée par la petite vérole, & des avantages de l'inoculation pour la prévenir (*)
- **1911, Ross** : transmission homme-moustique du paludisme ; concept de densité critique de moustiques (ou d'animal porteur)
- **1927, Kermack & Mckendrick** : modèle **SIR**, souche des **modèles compartimentaux**, principe encore appliqué dans les modèles actuels

(*) Vraisemblablement 1^{er} modèle mathématique épidémiologique

Catégories d'outils de modélisation (1)

- Modèles **compartimentaux** (déterministes ou stochastiques).
- Modèles de propagation et de routage dans les réseaux « **petit monde** » par les données des Telco's
 - Identification des « **clusters** »
 - Analyse des mouvements de foule
 - Mesure de l'efficacité des outils de traçage
- IA: Initiative  (recherche d'une solution optimale pour le déconfinement)

Catégories d'outils de modélisation (2)

■ Approche par agents (SMA)

- Basé sur les mécanismes élémentaires d'interaction entre agents & environnement puis simulation

- Efficacité :

- Kiss (modèle simple) ou Kids (plus réalistes) mais difficile à utiliser. extrêmement didactique et populaire ; à la mode.
- Facile à mettre en place mais **pertinence des «règles» difficile à vérifier**

■ « Benchmarking » international

- Basé sur des données statistiques
- Contextes très variés entre pays donc comparaisons, difficiles

Données pour modélisation géographique

Les sources:

- « **Fadettes** » et autre bornage des opérateurs téléphoniques (15 milliards par jour)
- Localisation par **GPS** et applis spécifiques comme:
 - Google map
 - Facebook
 - Etc.
- Transactions via cartes de paiement, péages, etc..

NB: voir annexe pour le traçage

Ex. d'outils standards d'Orange

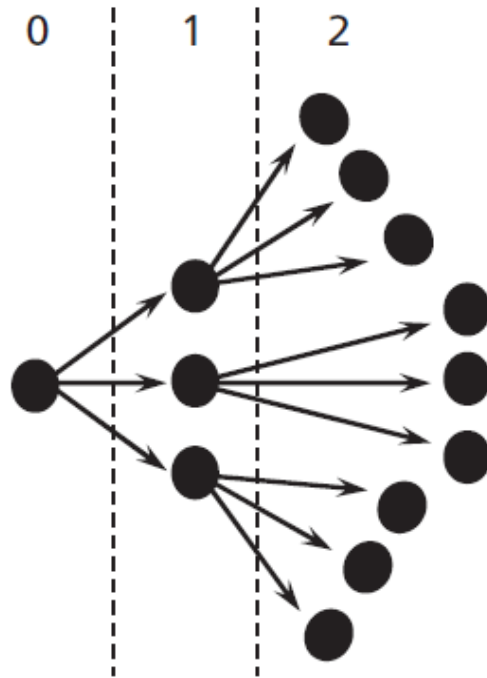
- Flux Vision est une solution d'indicateurs statistiques, provenant de la transformation des données anonymisées en temps réel du réseau mobile Orange. Ces données sont ensuite modélisées, puis redressées pour prendre en compte l'ensemble de la population présente en dissociant les internationaux des français.
- Flux Vision vous apporte une meilleure connaissance de vos clients et de la fréquentation de vos sites : affluence sur un site touristique ou lors d'un événement culturel ou sportif, analyse des flux sur un réseau de transport ou une zone de chalandise, etc.
- Avec Flux Vision, vous bénéficiez d'un outil d'aide à la décision supplémentaire qui vous permet notamment de maximiser vos investissements, d'optimiser vos infrastructures, de développer vos offres de services et d'améliorer votre communication.



Projet Inserm-Orange

L'Inserm, à travers l'une de ses équipes de recherche, s'est associé avec Orange pour étudier l'impact du confinement sur la mobilité des populations et pour explorer la manière dont l'usage des **statistiques issues du réseau de téléphonies mobiles** pourrait permettre de mieux prédire l'évolution de la pandémie de Covid-19.

Epidémies : repères basiques



Principes connus:

- Réaction en chaîne
- Taux de reproduction déjà connu en démographie
- **Notion de Seuil**

Ro, taux de **reproduction**

$$\mathbf{Ro = C \times P \times D}$$

C : nb moyen de contacts par jour

P: probabilité pour qu'un infecté infecte un sain au cours d'un contact

D: Durée moyenne de la contagiosité

Ro détermine le **seuil** du phénomène exponentiel:

■ $Ro > 1$ épidémie

■ $Ro < 1$ l'infection ne s'installe pas, pas d'épidémie

Exemples de R_0 épidémiques

Disease	Transmission	R_0
Measles	Airborne	12–18
Smallpox	Airborne droplet	5–7
Polio	Fecal-oral route	5–7
Rubella	Airborne droplet	5–7
Mumps	Airborne droplet	4–7
HIV/AIDS	Sexual contact	2–5
SARS-CoV	Airborne droplet	2–5
Influenza (1918 pandemic strain)	Airborne droplet	2–3
2019-nCoV (Wuhan)	Airbone droplet (?)	1.4–2.5*
Ebola (2014 Ebola outbreak)	Bodily fluids	1.5–2.5

*WHO Estimate, 23 Jan 2020

2 axes pour diminuer $R_0 = C \times P \times D$

C: nombre moyen de contacts par jour (décisions centrales)

- Confinement global ou sélectif, contrôle d'accès aux lieux collectifs
- Détection: température, test de dépistage et isolation des cas infectés
- Traçage autoritaire ou décentralisé
- Plus tard: Vaccination

■ **P: probabilité d'infection d'un contact** (actions individuelles)

- Masque, distance minimale, hygiène

Modèle SIR (Sains, Infectés, Rétablis)

- Modèle théorique permettant des simulations d'évolution
- Le modèle SIR applique le concept du **compartimentage** : population répartie en plusieurs états, avec transitions entre états
- Modèle **dynamique** (évoluant dans le temps)
- Le modèle de base a été amélioré avec de nombreuses options pouvant être complexes

Modèle S.I.R.

3 compartiments d'états variables en fonction du temp:

- $S(t)$: individus sains
- $I(t)$: individus infectés
- $R(t)$: individus rétablis

Population constante: $S + I + T = N$ (*)

2 coefficients de transition:

- β appelé taux de transmission
- λ est la durée moyenne d'infection (on utilise aussi γ appelé taux de rémission, inverse de λ , durée moyenne d'infection)

(*) les modèles améliorés incluent un taux de létalité

Modèle S.I.R.



- Contacts infectants proportionnels à $S(t)$ et $I(t)$

$$\text{Infectés} = \beta \times S(t) \times I(t)$$

- Durée moyenne d'infection : λ jours.

$$\text{Le flux de rémission/jour: } I(t)/\lambda$$

- Taux de reproduction R_0 proportionnel à $\beta \times \lambda$

Les équations du modèle S.I.R

$$dS(t)/dt = - \beta \cdot I(t) \cdot S(t)$$

$$dI(t)/dt = \beta \cdot I(t) \cdot S(t) - I(t)/\lambda$$

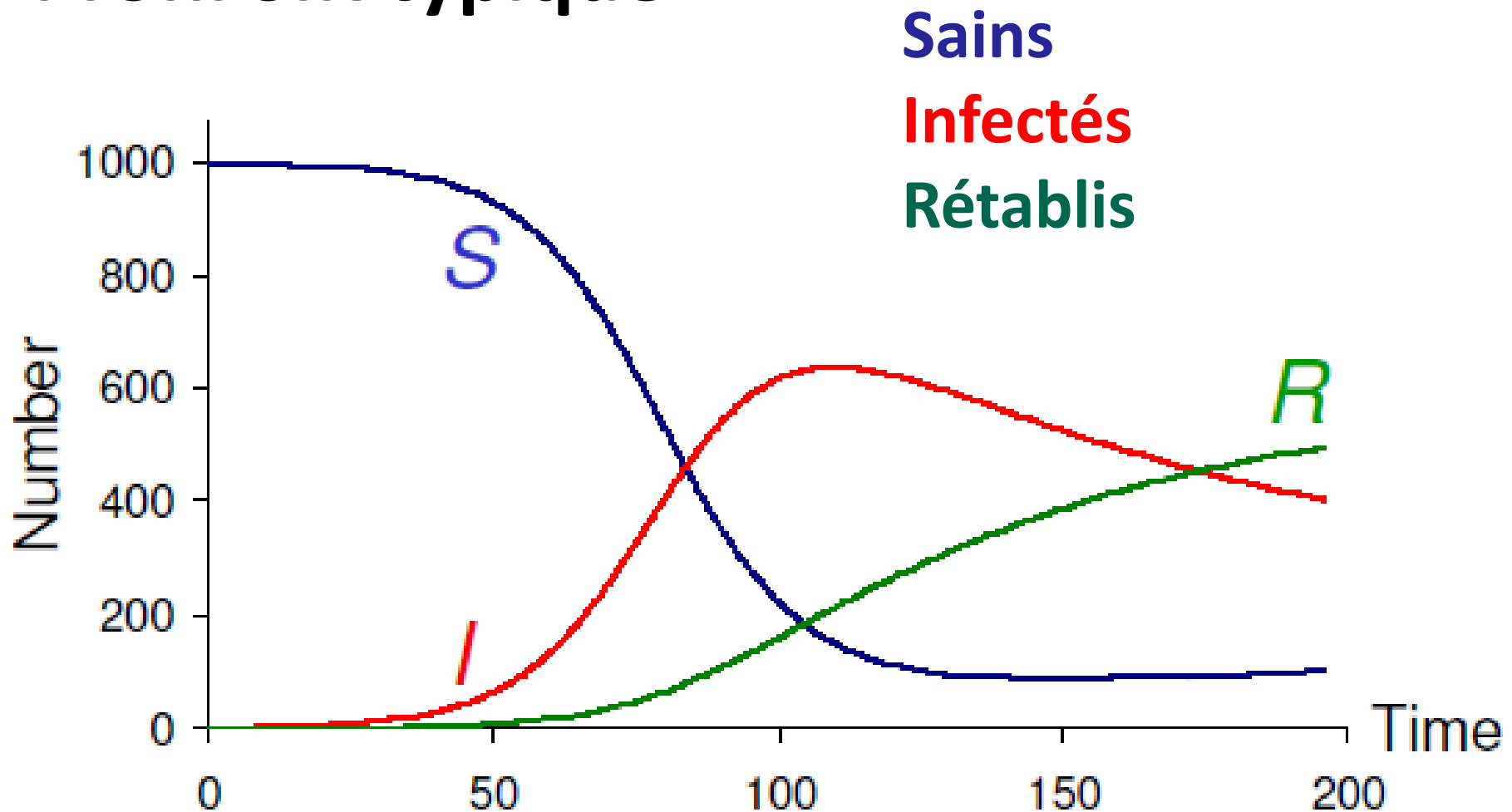
$$dR(t)/dt = I(t)/\lambda$$

Taux de
reproduction
 R_0
proportionnel
à $\beta \times \lambda$

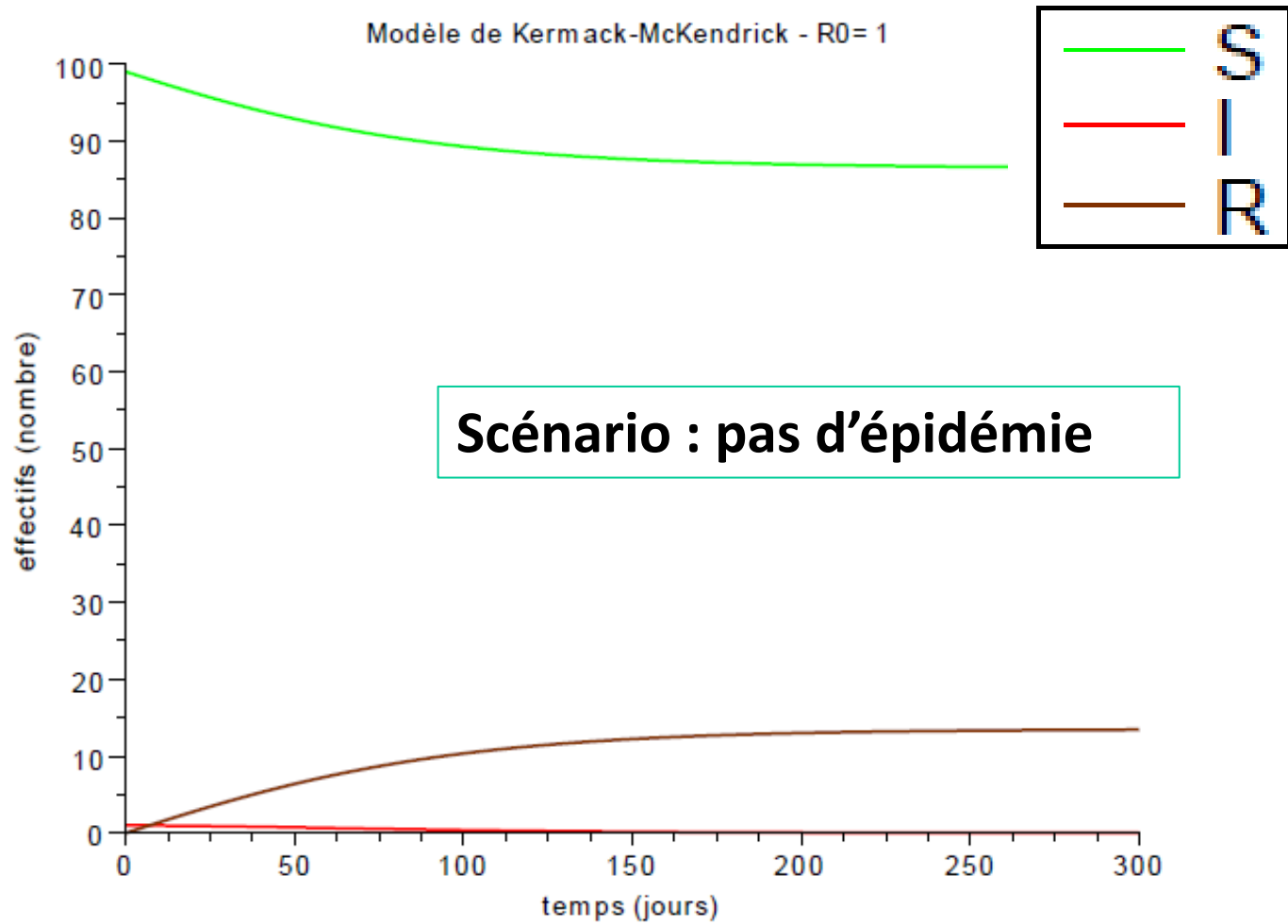
Equations différentielles non linéaires: => **simulation numérique.**

En faisant varier les paramètres l'on peut découvrir des principes de base.

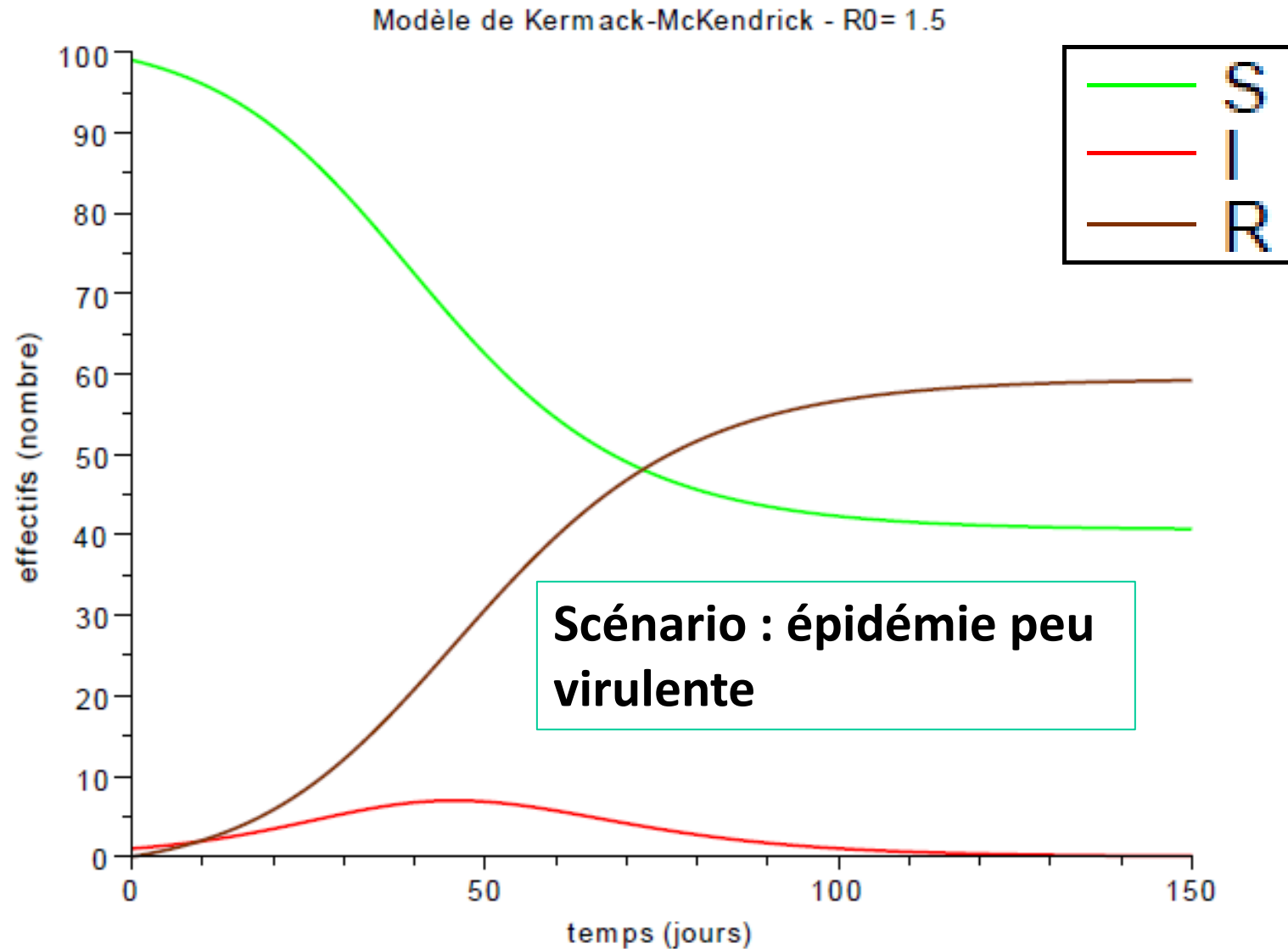
Profil SIR typique



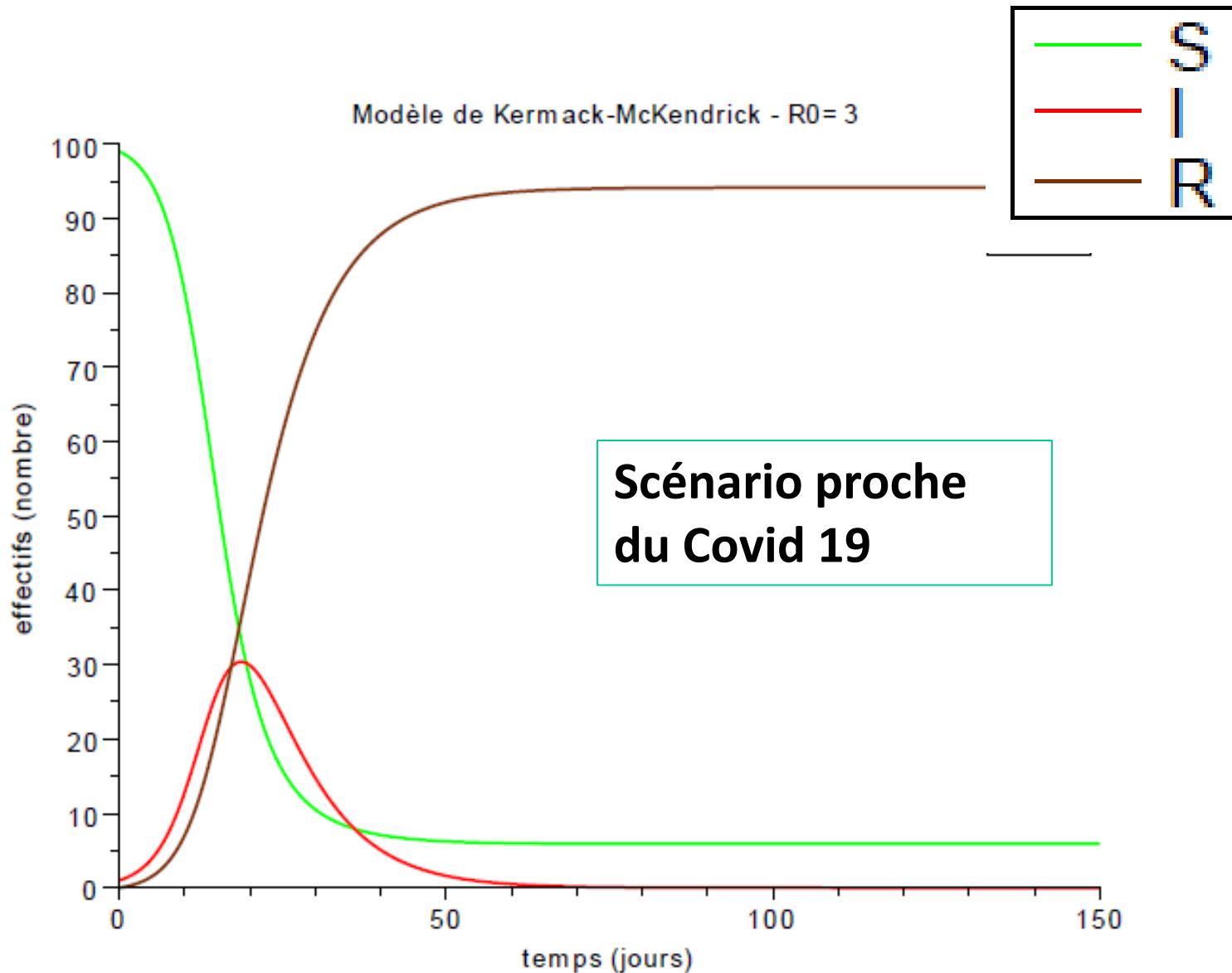
$R_0=1$



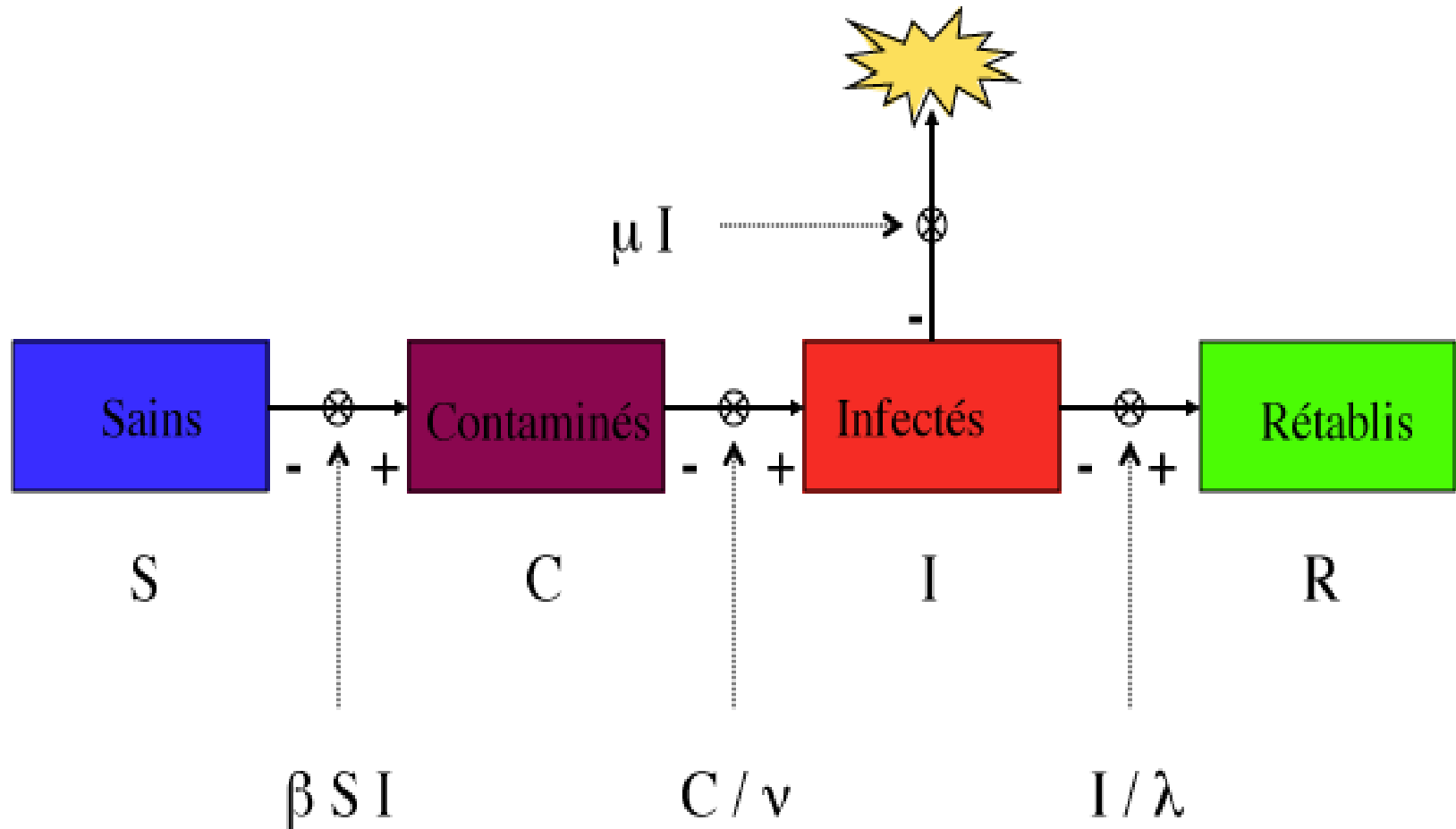
$R_0=1,5$



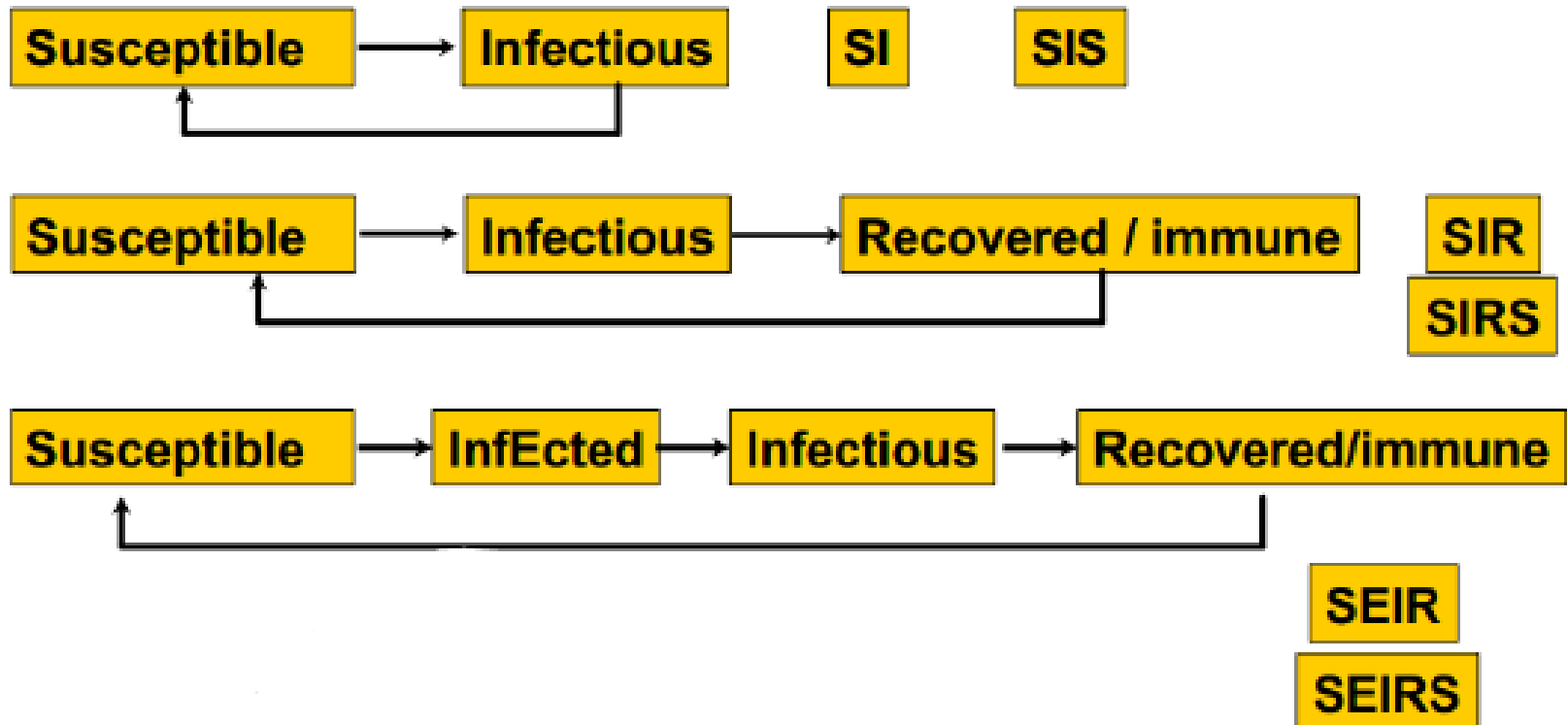
$R_0=3$



SCIR avec taux de létalité μ



Nombreuses déclinaisons du modèle SIR



Conclusion sur le modèle compartimental

Principe toujours utilisé avec de nombreux perfectionnements

■ Utilité

- Evaluation d'efficacité des scénarii d'évolution
- **Réduction de l'incertitude** (théorie de l'Information)

■ Cité dans la plupart des études récentes, p. ex :

- Synthèse de la littérature scientifique (Thibault FIOLET Ingénieur AgroParisTech, Doctorant à l'Université Paris Saclay en Santé Publique)
- Quantifying the effect of quarantine control in Covid-19 infectious spread using **machine learning** (MIT)

Les grandes incertitudes

■ Caractéristiques du virus

- Durées (incubation, contagiosité)
- Rémission définitives ou pas

■ Efficacité des tests

- Virologiques
- Sérologiques
- Traçage

■ Échéances des outils

- Vaccins
- Médicaments

Scénarii internationaux

Facteurs clé?

Masques

Dépistages

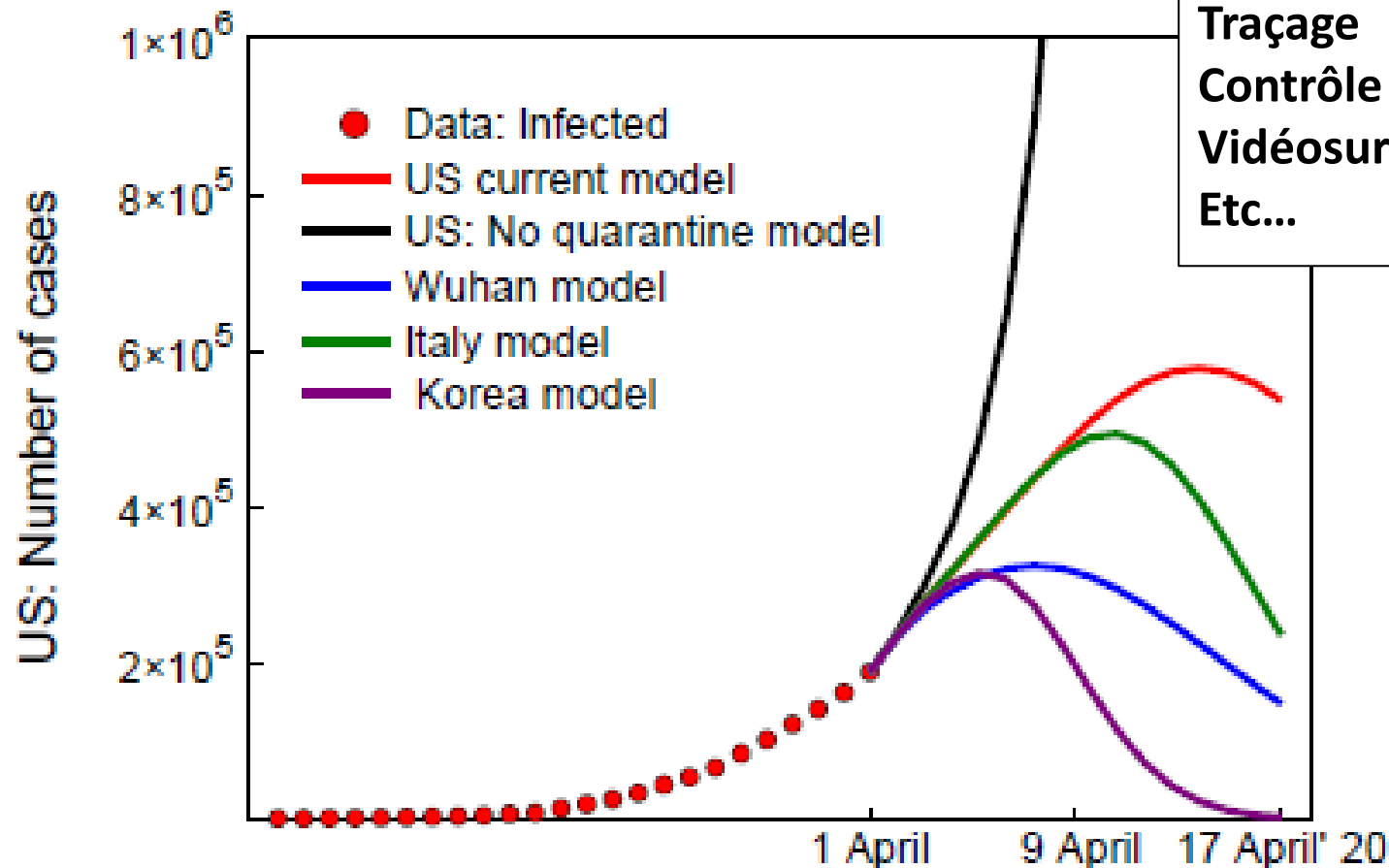
Confinement

Traçage

Contrôle d'accès

Vidéosurveillance

Etc...

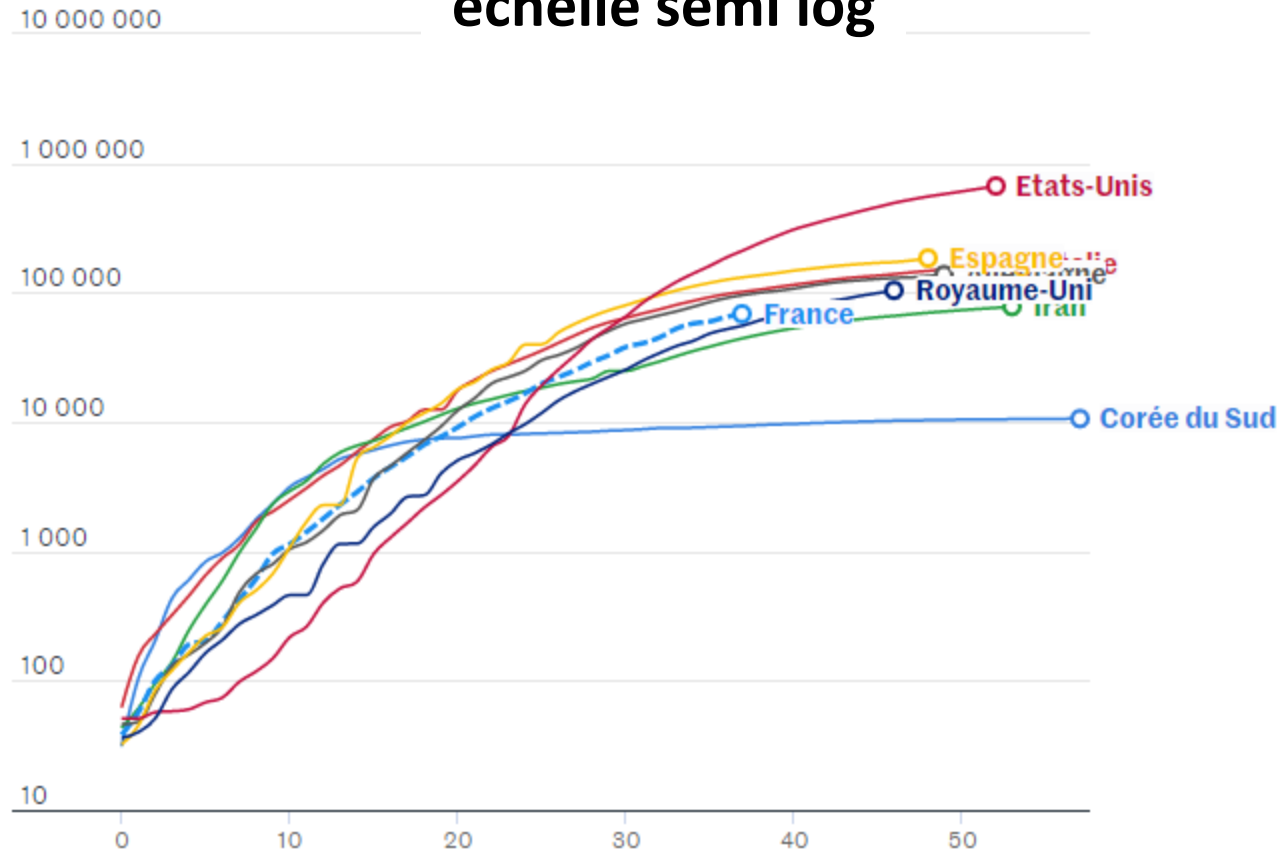


Source: article MIT cité par G.B.

Comparaisons internationales

CAS DE COVID-19 DANS LES 8 PRINCIPAUX FOYERS

Rythme en
échelle semi log



Note : le mode « rythme » adopte une échelle logarithmique afin de mieux visualiser le rythme de

Facteurs Clé ?

	Chine	Corée S	Singapour	Japon	Portugal	Italie	UK	Allemagne	France
Masques Grand Public									
Dépistages									
Température									
Virologie									
Confinement									
Traçage									
Localisation GPS									
Décentralisé Bluetooth									
Contrôles									
Accès lieux publics									
Bracelet électronique									

A faire

Quelques conclusions

- La modélisation **totallement nécessaire a des résultats limités**
 - Manque de données collectives
 - Et surtout « portrait du virus » encore très flou
- Elle est très utile pour **évaluer la pertinence des décisions** en essayant de réduire le R_0 :

C, occasion de contacts / P, Efficacité des contacts pour la diffusion / D, durée de la contagiosité ou dépistage, contrôles, identification des clusters, etc.
- Illustration des limites : la détermination du processus de **déconfinement utilise le « pif » aidé par la modélisation. Quid de l'initiative Covid IA ?**
- Dans notre réseau petit monde, **pandémie probable et rapide** à cause, en particulier, des masses de transports de marchandises et de voyageurs

Annexe: les outils de traçage

- **Autoritaires: localisation par **GPS** et confinement style « bracelet électronique »**
- **Traçage numérique avec détection de proximité par **Bluetooth**:**
 - **DP-3T**, pour *Decentralized Privacy-Preserving Proximity Tracing*, solution p. ex. défendue par Apple et Google (sans serveur central)
 - **ROBERT**, pour *ROBust and privacy-presERving proximity Tracing*, solution française en cours de développement (avec serveur central)

Effacité des outils de traçage ?

- Suppose que le « quorum » soit atteint, dépend de:

% de population avec smartphone ad hoc

X

% de personnes ayant chargé l'appli

X

% des personnes ayant activé l'appli

X

% Compatibilité applis IOS-Android