

UNE TENTATIVE DE MODELISATION DE LA PANDEMIE DU COVID-19

F.Caussarieu@trin-partners.com

Rennes le 30 mars 2020

1 ABSTRACT

Ce document décrit une tentative expérimentale de modélisation de la crise sanitaire du COVID-19. Elle a permis à son auteur de se familiariser avec les algorithmes et équations épidémiologiques applicables, et de rechercher l'impact des politiques de santé suivies par différents pays sur les paramètres de la modélisation.

Il n'a pas la prétention d'effectuer une prévision réaliste, mais d'approcher des ordres de grandeur.

L'étude a permis de dégager quelques résultats :

1. Résultat 1 : Il est possible de modéliser non seulement le début d'une pandémie de type SIR, mais également son atténuation provoquée par des mesures sanitaires (confinement, dépistage,...)
2. Résultat 2 : Le modèle peut être ajusté au processus de santé spécifique à une pandémie de type COVID-19 (flux infectés / hospitalisés / réanimés/ Remis ou décédés), et permet de prévoir l'ampleur de la demande de soins sur le système de santé ;
3. Résultat 3 : le modèle peut intégrer les effets de seuil liés à la saturation des moyens de soins (ICU's dans le cas de COVID-19) ;
4. Résultat 4 : L'ampleur de la pandémie est très directement corrélée avec le délai de mise en place de mesures sanitaires fortes, en l'absence de moyens médicaux efficaces (vaccins, traitements).

Table des matières

1	ABSTRACT	1
2	OBJECTIF DE LA MODELISATION	3
3	PRINCIPES DE MODELISATION UTILISES.....	4
3.1	Modèle SIR.....	4
3.2	Introduction du principe de confinement et de palier.....	5
3.3	Gestion de l'évolution de Re ou de Tau_ selon la phase de l'épidémie.....	6
3.4	Introduction des flux : hospitalisations, réanimations, guérison ou décès.....	8
4	METHODE ET OUTIL DE MODELISATION	10
5	REGLAGES DU MODELE	13
5.1	VISUALISATION DES DONNEES OFFICIELLES.....	13
5.2	Pays précurseur : la Chine	15
5.3	Modélisation France.....	16
6	JEUX DE PARAMETRES.....	20
7	PROJECTIONS.....	21
8	LIMITES DE L'EXERCICE ET POINTS D'APPROFONDISSEMENT.....	23
9	REFERENCES	24
10	ANNEXES.....	24

2 OBJECTIF DE LA MODELISATION

J'ai utilisé cette période pour approfondir mes connaissances en modélisation, en épidémiologie, et en connaissance de mon outil préféré de modélisation, QUANTRIX (voir www.quantrix.com), que j'utilise habituellement en modélisation financière des business-plans des entreprises.

En faisant ce travail, je n'ai pas la prétention de faire une prévision opérationnelle exploitable, mais de comprendre les mécanismes à l'œuvre autour de la diffusion de la maladie, l'impact des mesures de lutte prises par certains pays, et de visualiser la sensibilité du modèle à ces mesures.

Je vais tenter de vous faire partager le parcours effectué, en espérant ainsi susciter des critiques, suggestions, réactions, permettant d'améliorer le travail effectué.

Je me suis limité à étudier quelques pays, présentant des profils différents et complémentaires :

- Les « précurseurs », ayant mise en œuvre une politique de confinement et de tests intensifs dans un délai court (moins de 30 jours après le début de l'épidémie) vainqueurs de l'épidémie, dont nous avons à apprendre car ils nous ont précédé dans l'épidémie et car ils l'on quasiment vaincue :
 - o La Chine
 - o Le Corée du Sud
- Les « pays en confinement », qui ont mis en œuvre relativement tôt (30 jours à 40 jours après le début de l'épidémie) une politique stricte de confinement :
 - o Italie
 - o France
 - o Espagne
- Les « pays sans confinement ou à confinement tardif » (délai de confinement supérieur à 45 jours) :
 - o Suisse
 - o UK.

Après avoir présenté les principes de modélisation, l'article présente la méthode de modélisation implémentée, puis les réglages effectués sur le modèle numérique, dont on déduit les jeux de paramètre du modèle.

Une tentative de projection est alors proposée, suivie d'une discussion sur les limites de cet exercice.

3 PRINCIPES DE MODELISATION UTILISES

3.1 Modèle SIR

L'approche retenue est celle d'une modélisation de type SIR, car elle est bien adaptée au phénomène de contagion infectieuse.

L'article de François Rechenmann (11) commence ainsi : « *La propagation d'un agent infectieux au sein d'une population est un phénomène dynamique : les effectifs d'individus sains et malades évoluent dans le temps, en fonction des contacts au cours desquels cet agent passe d'un individu infecté à un individu sain non immunisé, l'infectant à son tour. Un tel phénomène peut être étudié en le modélisant par des équations différentielles et en déterminant son comportement à travers la résolution numérique de ces équations.* ».

Le trigramme SIR signifie :

- S= Sains ou « Susceptibles d'être infectés ultérieurement » (*Susceptibles*)
- I = Infectés (*Infected*)
- R = Rétablis (*removed*)

Le modèle de base est le suivant (11) :

$$\frac{dI(t)}{dt} = \beta IS - \frac{I}{\lambda} - \mu I$$

avec $1/\lambda$ taux de guérison, et λ = la durée de guérison d'une personne infectée

avec μ = taux de mortalité des infectés

et

$$\frac{dS(t)}{dt} = -\beta IS - \mu I$$

Et

$$\frac{dR(t)}{dt} = I/\lambda$$

Et

$$\frac{dD(t)}{dt} = \mu I$$

On obtient :

$$\frac{dS(t)}{dt} + \frac{dI(t)}{dt} + \frac{dR(t)}{dt} + \frac{dD(t)}{dt} = -\beta IS - \mu I + \beta IS - \frac{I}{\lambda} - \mu I + \frac{I}{\lambda} + \mu I = -\mu I$$

Ce qui correspond à la diminution de la population totale P par décès D.

Une personne saine va transmettre statistiquement le virus à R_0 personnes (typiquement 2,5) (1) ; R_0 est le « *basic reproductive number* » (6).

R0 se définit par :

$$R0 = C \times P \times D$$

c'est-à-dire le nombre de contacts par jour de cette personne x Probabilité de transmettre le virus à chaque contact x la durée d'infectiosité de la personne.

Application numérique en non-confinement : D = 10 jours, P = 0,5%, C = 50 contacts par jour, R0 = 2,5 ; c'est ce qui a été observé en Chine (6).

Application numérique en confinement : D = 10 jours, P = 0,5%, C = 5 contacts par jour, R0 = 0.25 . (6)

Si on définit T0 comme étant le taux de croissance du nombre d'infectés correspondant au coefficient de contamination R0, la relation entre T0 et R0 s'exprime de la façon suivante :

$$\frac{dR0(t)}{dt} = C0 \times P0 = T0$$

T0 est le taux de croissance journalier dû aux nouvelles infections. T0 est une grandeur permettant facilement la programmation et la simulation numérique.

Application numérique : 50 contacts x 0,5% = 0,25 soit T0 = 25% de croissance du nombre d'infectés par jour.

La croissance de la population infectée, au début de la courbe sans prendre en compte l'effet immunisation peut s'exprimer de la façons simple suivante :

I1 = I0 (1+T0) : Infectés au jour 1 = infectés au jour 0 augmentés du taux de nouveaux infectés

De façon algorithmique, cela s'exprime par : I1 = I0 x (1,25)

$$I(1t + 1) = I(t) \times T0$$

En se référant à l'équation vue plus haut, il est possible de calculer la relation entre T0 et β :

$$\frac{dI(t)}{dt} = \beta I S = I(1 + T0)$$

Donc

$$\beta = \frac{(1 + T0)}{S}$$

Application numérique : T0 = 0.25 hors confinement, S = 60 Millions, $\beta = 2.08 \times 10^{-8}$

Il aurait été possible de normer β à la population afin d'éviter de manipuler l'ordre de grandeur de β ; j'ai préféré l'autre méthode équivalente utilisant T0 appliqué à I.

3.2 Introduction du principe de confinement et de palier

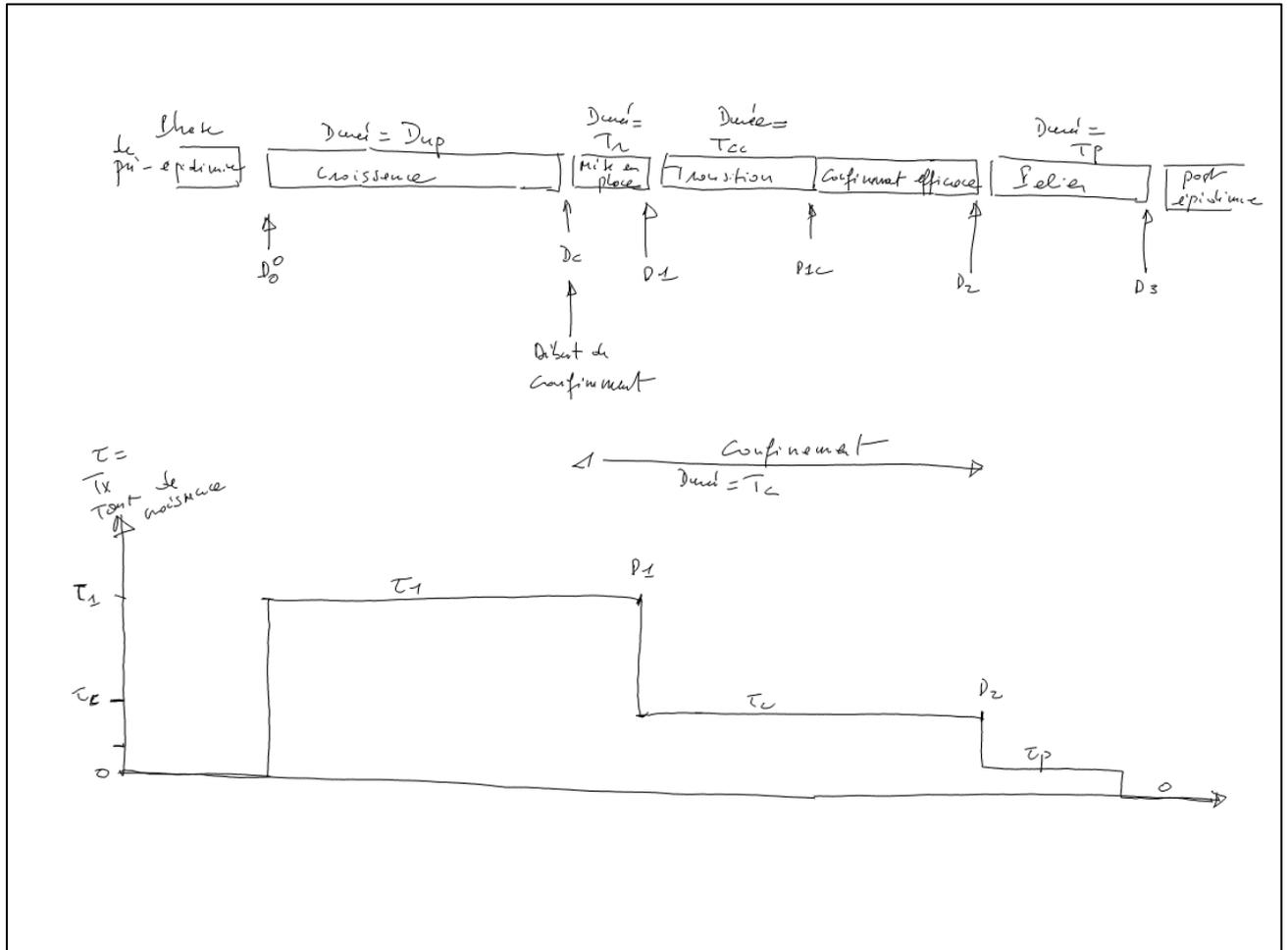
J'ai repris le modèle proposé et y ai rajouté quelques compléments :

- J'ai introduit la réduction du taux de transmission du virus (R_e) en phase de confinement, avec (**voir le graphe au §3.3 page suivante**) :
 - Un taux de détection α prenant en compte le fait que seule une partie de la population infectée est détectée et comptabilisée (I_d), qu'une autre large partie n'est pas documentée (I_u),
avec $I = I_d + I_u$, et avec $I_d = \alpha \times I$;
 - Un taux maximum de la population pouvant être infectée et immunisée avant extinction de la propagation naturelle du virus :
 $P_i = \gamma P$
 - Pour initialiser le modèle SIR, j'ai repéré sur les suites de cas réels, pays par pays, la date D_0 à laquelle l'exponentielle « décollait » avec $I_d \sim 5-10$ cas reportés ;
 - J'ai identifié la date D_c de début de confinement choisie pays par pays, comme étant le nombre de jours sans confinement T_{nc} rajoutés à la date D_0 ci-dessus ;
 $D_c = D_0 + T_{nc}$
 - J'ai introduit un délai de réponse du confinement T_r matérialisant le temps de sa mise en place et le temps nécessaire au changement de pratique des humains concernés ; ce qui permet de définir la date D_1 à partir de laquelle le R_0 diminue :
 $D_1 = D_c + T_r$
 - Un temps de passage progressif du mode non confiné au mode confiné au cours duquel R_e passe de R_0 à R_c (pente décroissante linéairement à partir de la date D_1 de début du confinement jusqu'à la date D_{1c} au bout du temps T_{cc}) ;
 $D_{1c} = D_1 + T_{cc}$: D_{1c} est la date à laquelle pendant le confinement, le taux de croissance de l'épidémie est devenu égal $= T_c$
et
 $D_2 = D_1 + T_c$: D_2 est la date de fin du confinement et de passage à l'étape « palier »
 - Le taux de croissance initial du modèle est T_0 correspondant à R_0 , puis devient T_c en confinement correspondant à R_c
 - J'ai introduit une « phase de palier » à la suite de la période de confinement au cours de laquelle la maladie est supposée vaincue mais avec un risque résiduel de quelques cas pouvant créer un effet rebond. Cela permet de modéliser ce risque en cas de confinement de durée insuffisante.
On définit donc $D_2 = D_1 + T_c$; et avec T_p = durée du palier ; et D_3 = date de fin du palier :
 $D_3 = D_2 + T_p$

3.3 Gestion de l'évolution de R_e ou de Tau selon la phase de l'épidémie

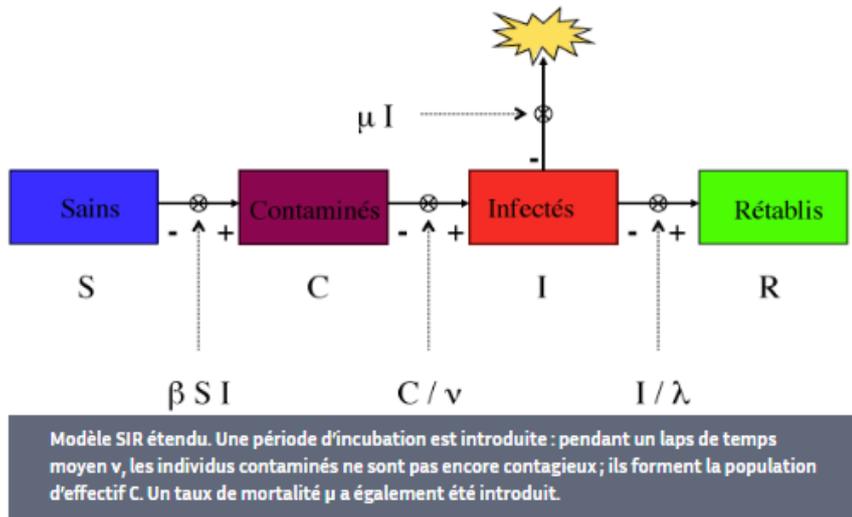
Afin de modéliser les importantes variations des taux de contamination, j'ai été conduit à distinguer 5 phases successives, illustrées sur le graphe ci-dessous :

- La phase de pré-épidémie ;
- La phase épidémique de croissance initiale ;
- La phase de confinement, elle-même divisée en sous phases ;
- La phase de palier, correspondant à la sortie d'épidémie ;
- La phase post-épidémique.



3.4 Introduction des flux : hospitalisations, réanimations, guérison ou décès

Le modèle (11) prévoit les flux suivants :



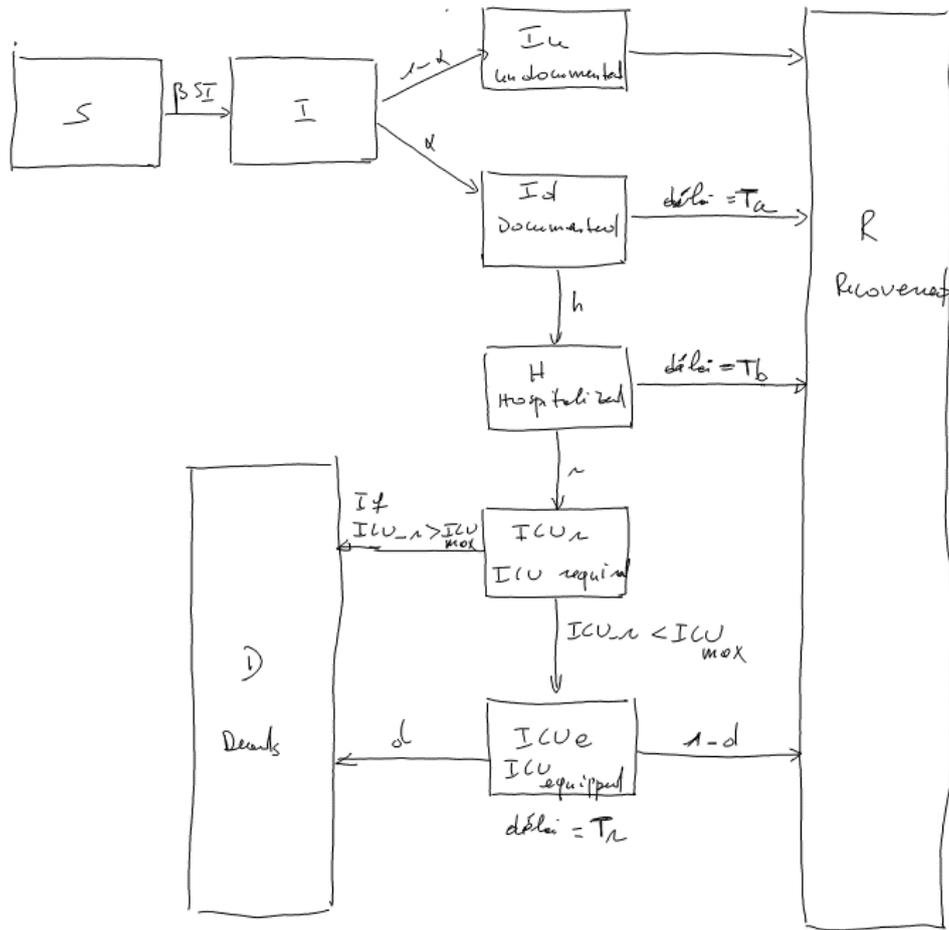
Le système devient :

$$\begin{aligned} dS/dt &= -\beta I S \\ dC/dt &= \beta I S - C/v \\ dI/dt &= C/v - I/\lambda - \mu I \\ dR/dt &= I/\lambda \end{aligned}$$

J'ai choisi de résoudre le système suivant, tenant compte du processus d'hospitalisation et de réanimation :

- Les Infectés se divisent entre les Infectés « officiels » I_d (« documented ») et les autres « undocumented » I_u . Le taux de documentés est appelé α (voir 7). Noter que $I_d + I_u = I$, total des Infectés.
- Les I_u sont supposés bénins et guérir.
- Les I_d se divisent entre ceux qui seront hospitalisés (variable d'état H , ratio h) et ceux qui seront bénins, malades à leur domicile et guériront (ratio $1-h$).
- Les H hospitalisés se divisent entre ceux qui auront besoin d'aller en soins intensifs avec respirateurs (variable d'état ICU_r , ratio r), et ceux qui seront sous observation pendant un temps T_b avant de guérir.
- Les patients en demandant de réanimation ICU_r se divisent entre ceux qui auront accès à un ICU (variable d'état ICU_e) et ceux qui n'y auront pas accès par pénurie de moyens (si $ICU_r > ICU_{max}$). Ces malheureux patients sont supposés décéder par manque d'ICU.
- Les patients ayant eu accès à un ICU se divisent à leur tour entre ceux qui décèdent (ratio d) et ceux qui guérissent (ratio $(1-d)$).

Le schéma ci-dessous présente l'arbre de flux :



Pour faire le lien avec les équations du modèle SIR vues en § 3.1 :

$$\frac{1}{\lambda} = \alpha (1 - h) + h(1 - r) + h r (1 - d)$$

$\mu = \alpha h r d$ ramené à la population totale y compris les non dépistés

$\mu = h r d$ ramené à la population dépistée)

Application numérique avec des valeurs type :

- $1/\lambda = 0,2 (1-0,4) + 0,4(1-0,3) + 0,4 \times 0,3 \times (1-0,15) = 0.5$ soit $\lambda = 2$
- $\mu = 0,2 \times 0,4 \times 0,30 \times 0,15 = 0.27\%$ de la population totale, ou 1.35% de la population dépistée

4 METHODE ET OUTIL DE MODELISATION

La modélisation a été effectuée en utilisant le logiciel QUANTRIX, qui est un tableur multidimensionnel connecté.

Deux dimensions ont été définies dans le cube :

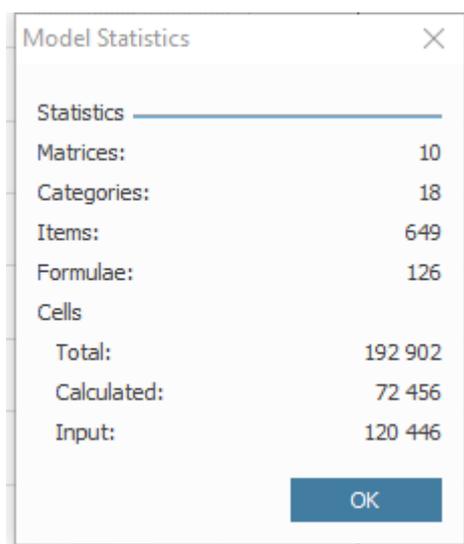
- Le temps sous forme d'une série de date (time-series)
- Les pays analysés.

Les données mesurées ou calculées sont des items (au sens du vocabulaire QUANTRIX) dans cet espace.

L'outil est à la fois utilisé d'une part en tant que BI (Business Intelligence) permettant de visualiser les données journalières « Time Series » provenant de source officielle (9), et d'autre part en outil de modélisation numérique gérant la récursivité.

Une matrice d'hypothèses a été définie par pays, et contient les variables du modèle et leurs ajustements reflétant la dynamique de la maladie propre à chaque pays.

Comme on le voit ci-dessous, le modèle utilise 126 formules, calcule 72456 cellules, et importe 120 446 cellules en provenance des bases de données officielles.



Statistics	
Matrices:	10
Categories:	18
Items:	649
Formulae:	126
Cells	
Total:	192 902
Calculated:	72 456
Input:	120 446

On voit au passage la puissance de cet outil qui gère près de 200 000 cellules de données avec seulement 126 formules de calcul ; c'est ce qui rend cet outil QUANTRIX remarquable.

Exemple de jeu de paramètres pour le France page suivante :

Taux de diffusion R0	2,412
Taux de diffusion Rc en confinement	0,120
Alpha Taux de détection	50,00%
Gamma taux plafond par immunisation	50%
Proportion maxi infectable et détectable	25%
Population max infectable et détectable Pi	16 750 000
Infection 0	24/1/20
Taux de croissance Tau_1	20,1%
Temps depuis jour Infection 1 à D0	18
Date Start D0	11/2/2020
Nb J avant confinement Tnc	34
Date début confinement Dc	16/3/2020
Temps de réponse confinement Tr	10,00
Durée UP en J	44
Date D1 fin UP	26/03/20
Durée de la transition croissance vers confinement Tcc	12
Pente de la transition croissance vers confinement	-1,59%
Date D1c atteinte du taux de confinement	07/04/20
Taux de croissance Tau_C confinement D1c à D2	1,0%
Date début palier D2	27/04/20
Durée du palier en J Tp	15
Taux de croissance Tau_P en palier	0,5%
Date fin palier D3	12/05/20
a asymptomatiques	20,0%
b malades bénins	38,0%
h hospitalisés	42,0%
r hospitalisés nécessitant un ICU	45,0%
g hospitalisés non ICU guéris	55,0%
gt part du total guéri après hospitalisation	23,1%
rt part du total en réanimation ICU	18,9%
d réanimés ICU décédés	55,0%
dt part du total ICU décédé	10,4%
ICUe guéris après ICU	45,0%
gICUt part du total guéri après ICU	8,5%
Controle	100,0%
Ta temps de guérison a	1
Tb temps de guérison b	12
Tr temps en réanimation	20
Number of ICUs	7500
Country population	67 000 000
Nb infectés début confinement	6668
Durée confinement Tc	33
Date fin confinement calculé D2	27/4/20
D2 pour 30j de confinement	15/4/20

Une matrice dynamique représentant les flux entre compartiments effectue les calculs vus plus haut en s'appuyant sur ces hypothèses. Un extrait de la matrice ci-dessous :

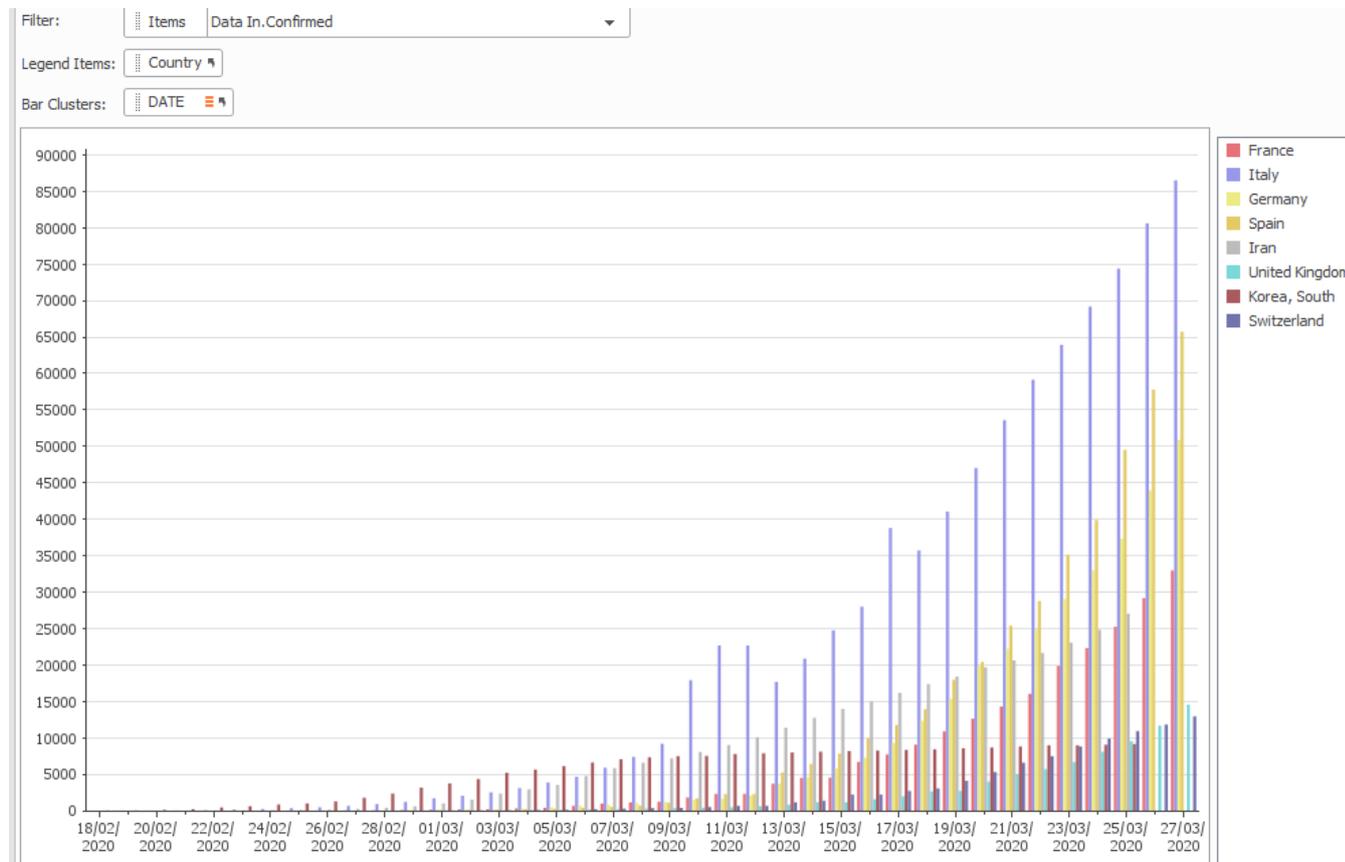
Country ▾ France		27/02/2020
Data In	Confirmed	38
	Infected_calculated_documented (Id)	206
	Infected_calculated_Undocumented (Iu)	206
	I= Ic + Id Total_infected_calculated	412
	Not_infected Susceptible (S)	16 749 579
	Pcg of population infected	0,0003%
	Deaths	2
	Delta C	34
	Temps depuis la 1ère infection	34
	In Hospital_documented	
	In ICU_documented	
Coef	Start Date D0	11/02/20
	DATE2	27/02/20
	Coef croissance	1,00
	Coef transition croissance vers confinement	0
	Coef confinement	0
	Coef palier	0
Taux de croissance	20,1%	
Data Out	delta C asymptotiques	7
	delta C a après Ta	7
	delta C bénins	13
	delta C b guéris après Tb	13
	delta C h hospitalisés	14
	delta C h hospitalisés après Tb	14
	delta C h hospitalisés non ICU guéris après Tb	1
	delta c nécessitant un ICU	5
	delta C r guéris après ICU après Tb	0
	delta C r morts après ICU après Tb	1
	delta R all recovered	22
	delta C morts par manque de ICU	0
	Sigma delta C Out	23
delta C - Delta C Out	11	
Stocks	Stock malades	68
	Cumul de morts calculé D	9
	Taux de létalité ramené à Ic+Id	2,08%
	Taux de létalité ramené à la population totale	0,00%
	H hospitalisés H	68
	ICU disponibles	7 500
	ICU_r ICU_required	16
ICU_e Nb of patients equiped with ICU	16	

Cette suite numérique permet d'enregistrer les données officielles importées, et de les mettre en regard des données calculées pour les mêmes grandeurs (Iu, D). Le modèle calcule également les autres compartiments (H, ICU_r, R).

5 REGLAGES DU MODELE

5.1 VISUALISATION DES DONNEES OFFICIELLES

Une visualisation brute des Id (Infectés documentés Confirmés) hors Chine donne :



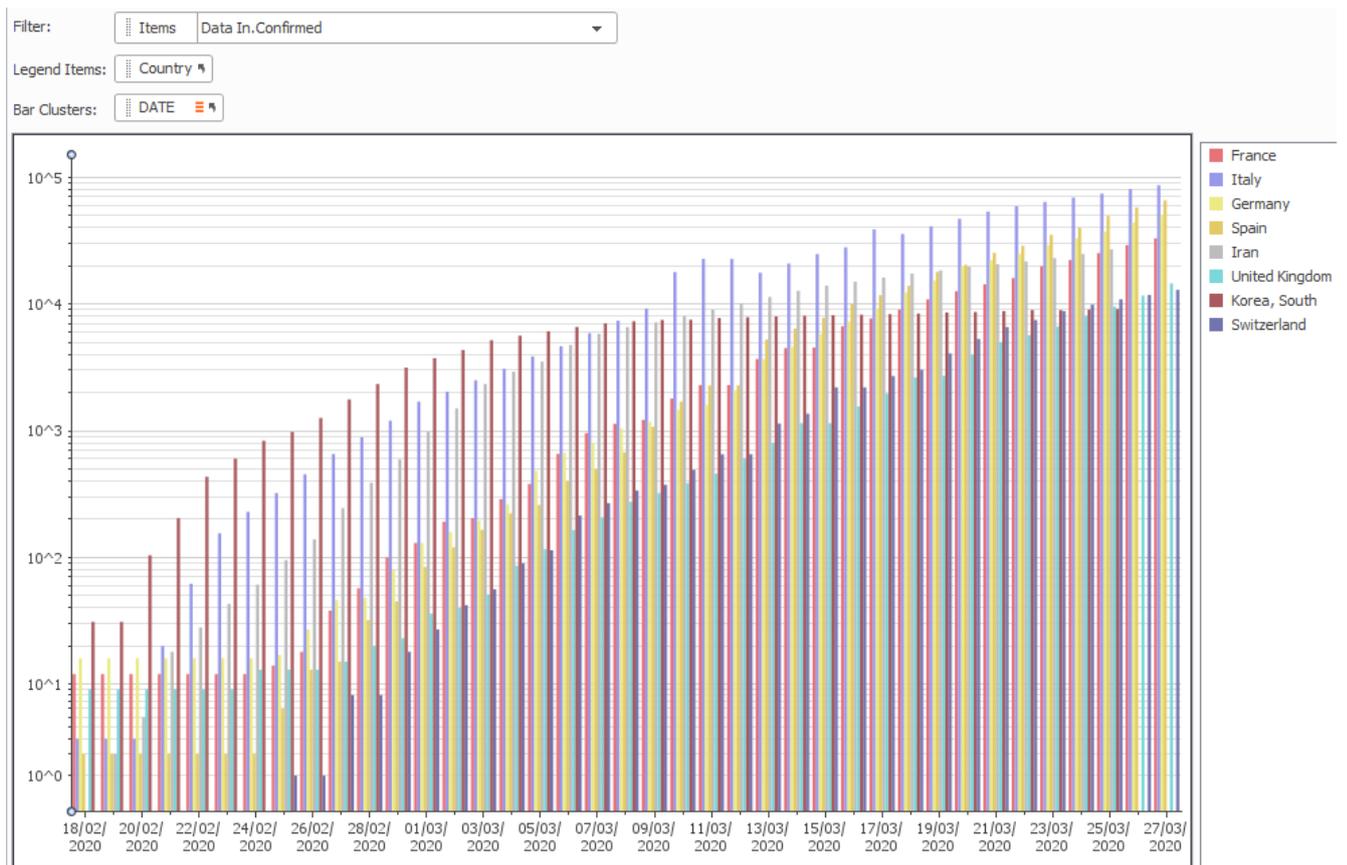
La France suit la courbe de l'Italie avec un décalage de 8 jours.

L'Espagne suit l'Italie avec un retard de 11 jours.

L'Allemagne suit l'Italie avec un retard de 9 jours.

UK suit l'Italie avec un retard de 15 jours.

Visualisation en logarithmique :



Les pentes de croissance en vision logarithmique sont identiques (parallèles) entre les pays Européens : la dynamique de propagation est similaire, avec des décalages dans le début de l'épisode.

Dans les paragraphes suivants, apparait la visualisation comparée des données officielles importées, et des données générées par le modèle pour deux grandeurs :

- Id (les infectés documentés)
- D (les morts liés à cette épidémie).

Ces visualisations ont permis de régler les variables du modèle, pays par pays.

Les paragraphes suivants montrent le résultat de ces réglages de façon visuelle. Les jeux d'hypothèses correspondant apparaissent dans le chapitre « jeux de paramètre solution ».

L'objectif a été de se déterminer les réglages permettant de se rapprocher au mieux des données officielles constatées. Le lecteur peut apprécier visuellement la fiabilité du modèle dans cette phase passée en comparant les courbes « calculées » et les courbes « constatées ».

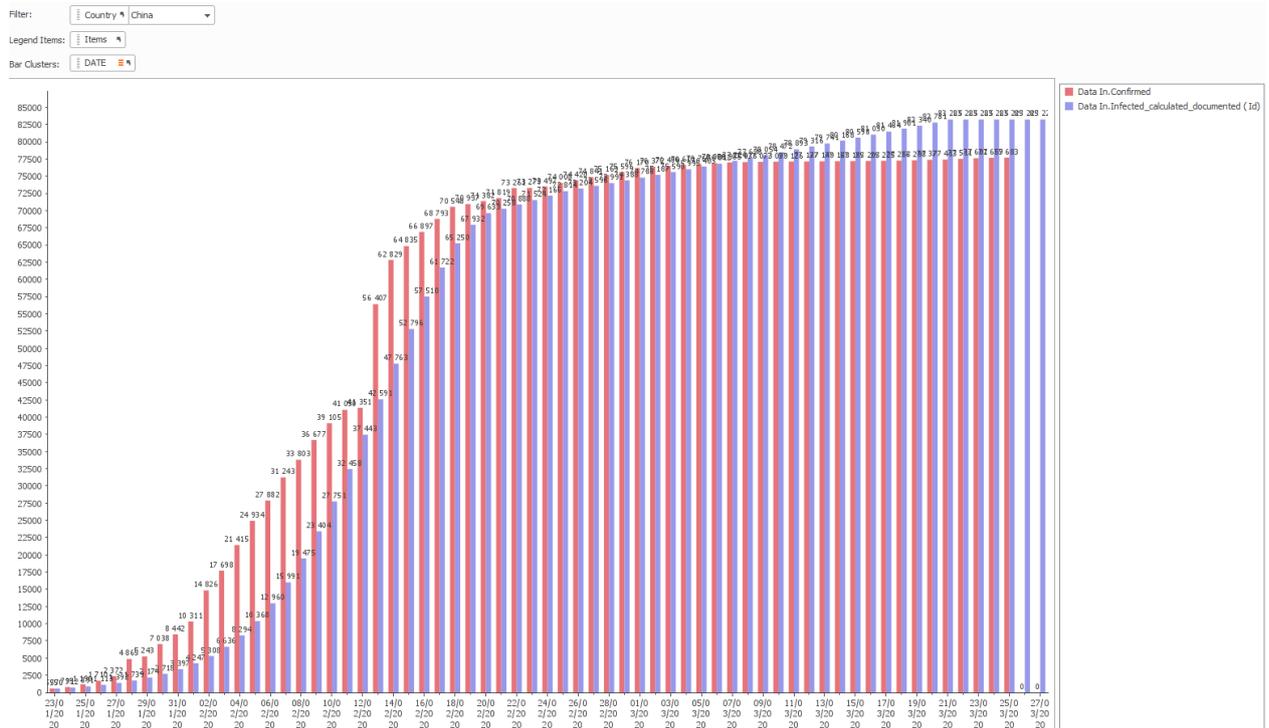
eux exemples sont donnés ici :

- La Chine qui est un modèle typique de confinement strict,
- La France qui est un modèle typique de confinement tardif et moins strict.

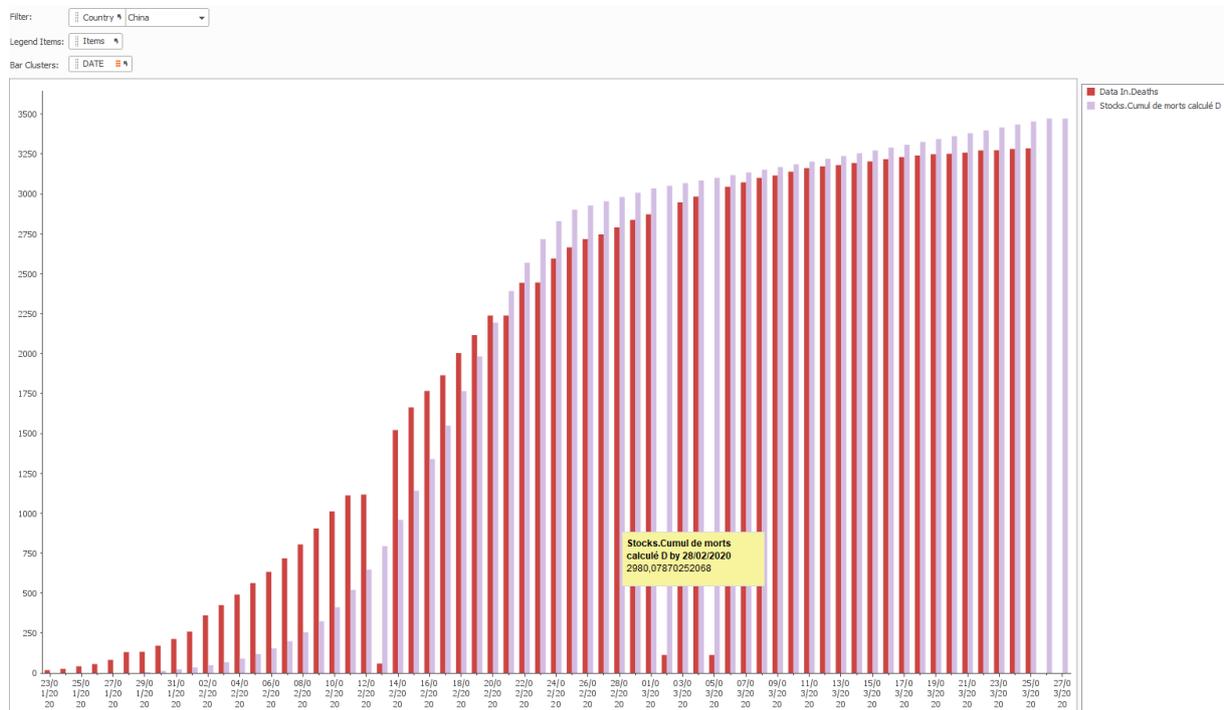
Le détail des autres pays est disponible en annexe.

5.2 Pays précurseur : la Chine

Visualisation du nombre de cas Id :



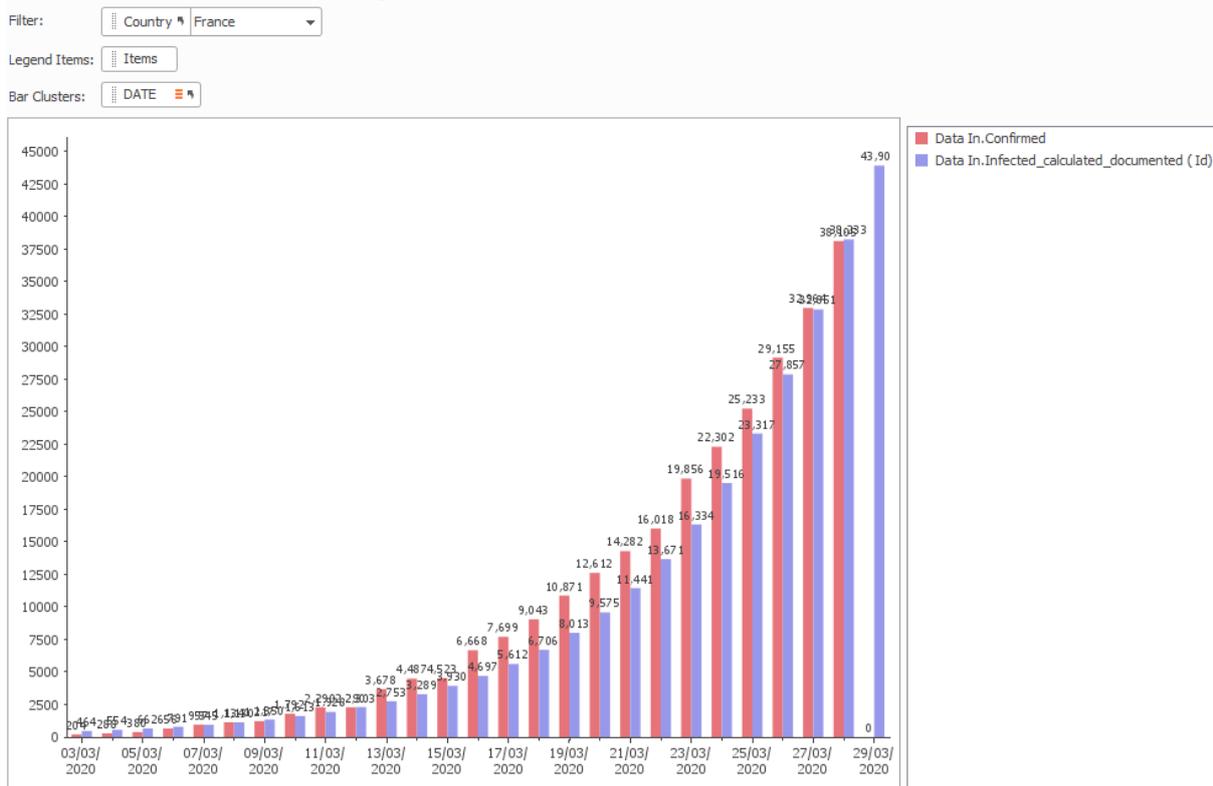
Visualisation des décès D :



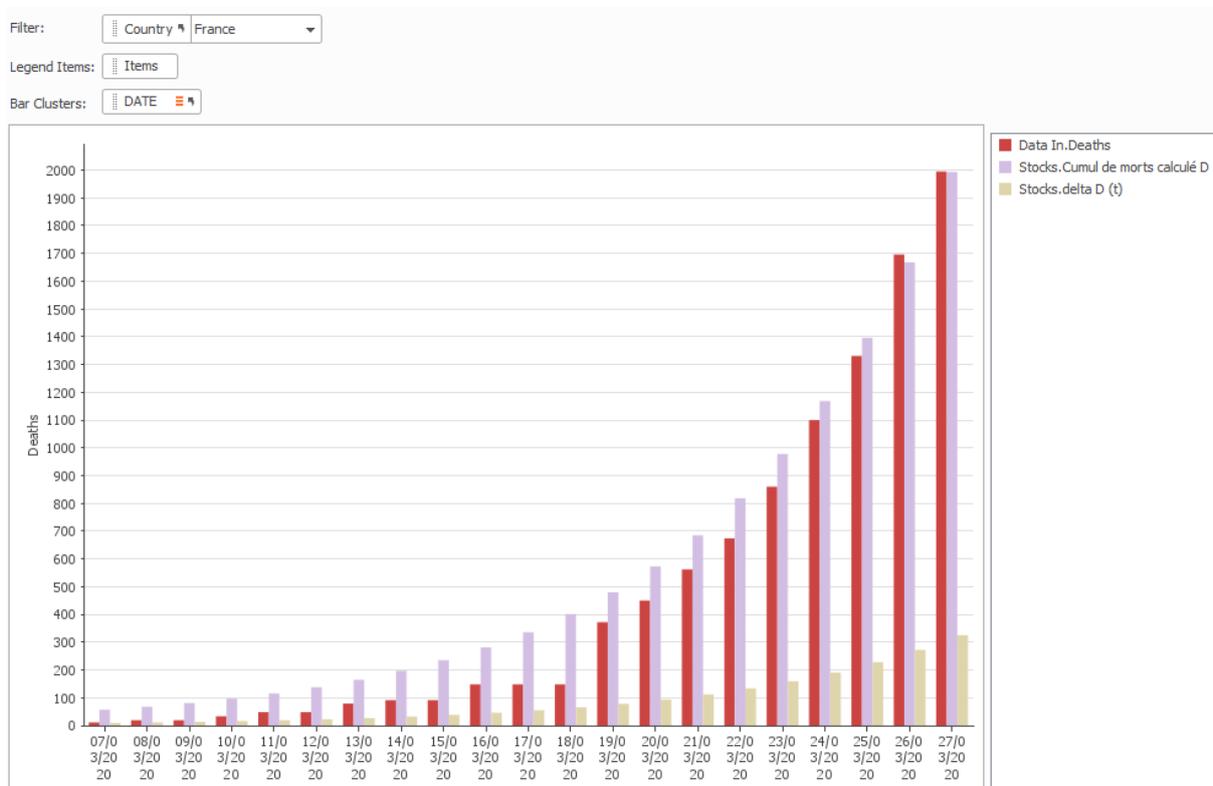
Résultat 1 : le modèle peut s'approcher de la réalité constatée dans des pays ayant réussi à juguler la pandémie par des mesures non médicales.

5.3 Modélisation France

Visualisation du nombre de cas Id :



Visualisation des décès D :

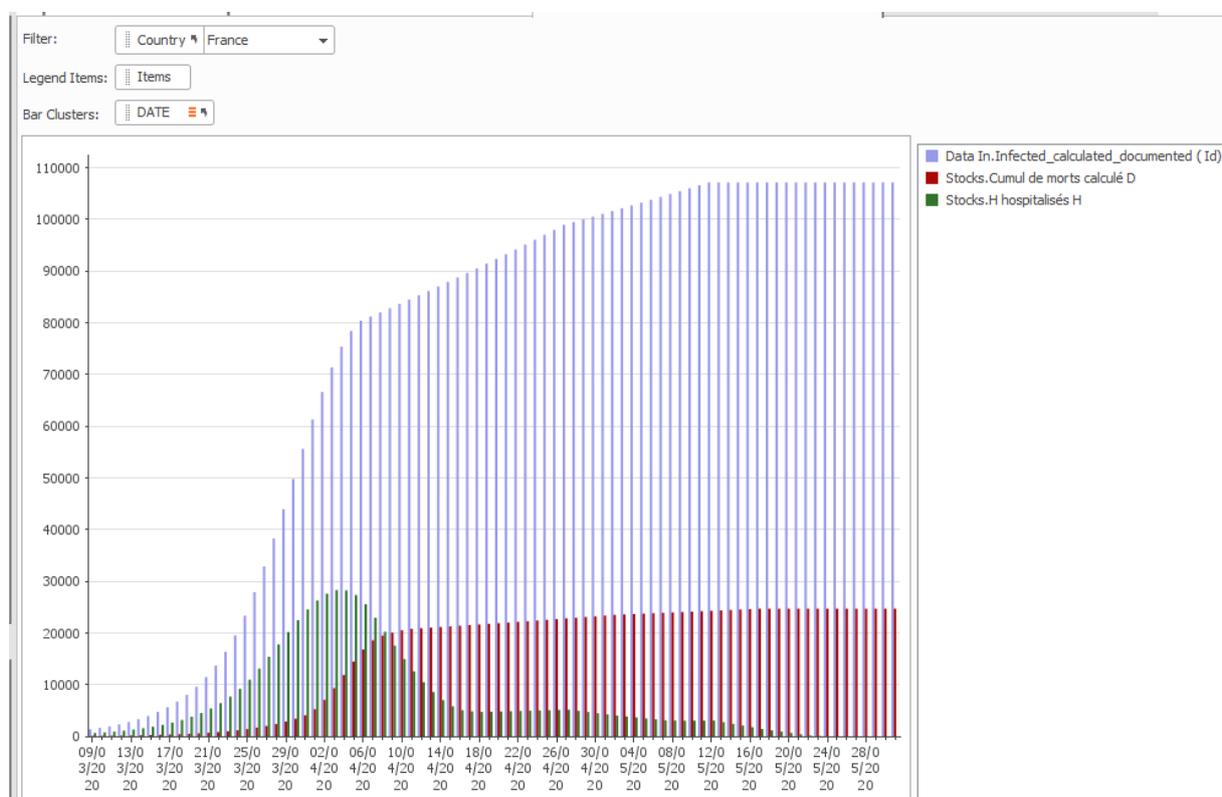


Le nombre de personnes hospitalisées (H), en réanimations (R) et décédées (D) est suivi durant la période de croissance actuelle, et comparé aux résultats du modèle. La marge d'erreur actuelle est inférieure à 10%.

Résultat 2 : Le modèle peut être ajusté au processus de santé spécifique à une pandémie de type COVID-19 (flux infectés / hospitalisés / réanimés/ Remis ou décédés), et permet de prévoir l'ampleur de la demande de soins sur le système de santé ;

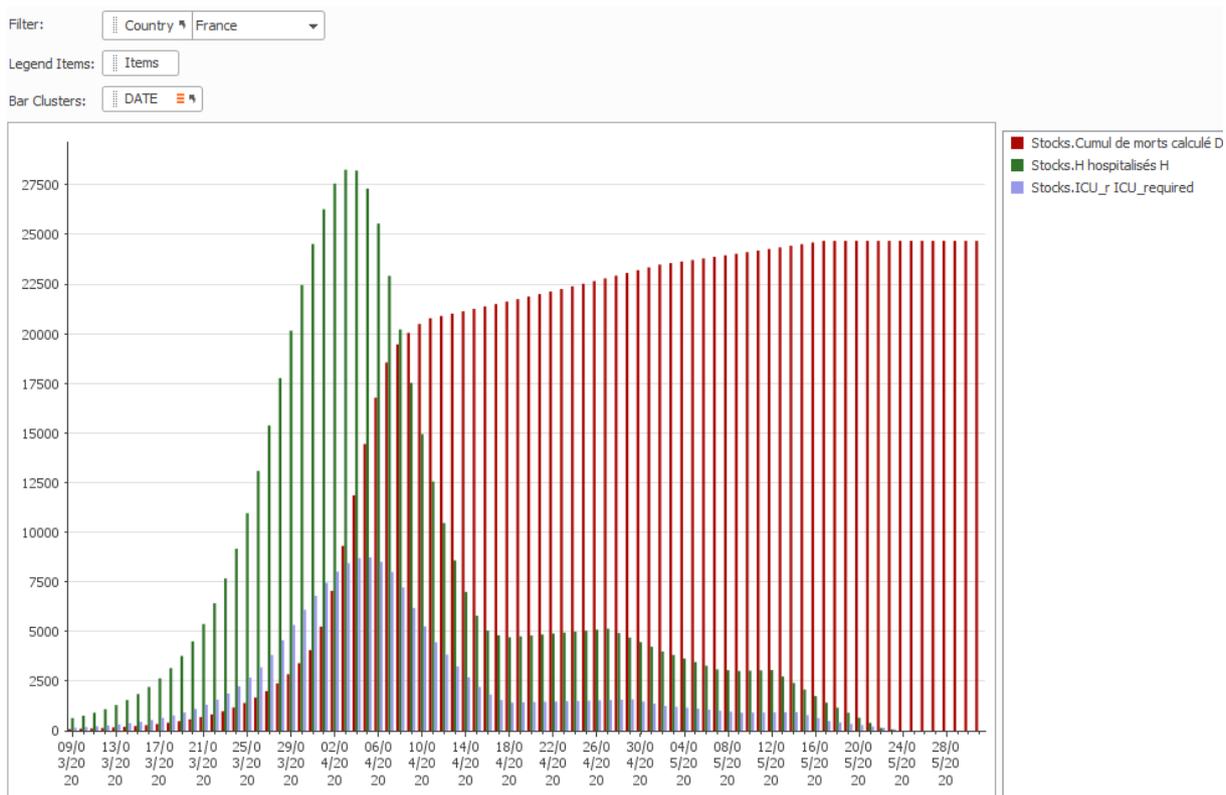
Le graphique ci-dessous montre le résultat du modèle pour la France concernant les grandeurs suivantes :

- Id le nombre d'infectés documentés
- H le nombre de personnes hospitalisées à l'instant t
- ICU_r le nombre d'ICU's nécessaires à l'instant t, à mettre en regard du nombre d'ICU's disponibles dans le pays (~7500).



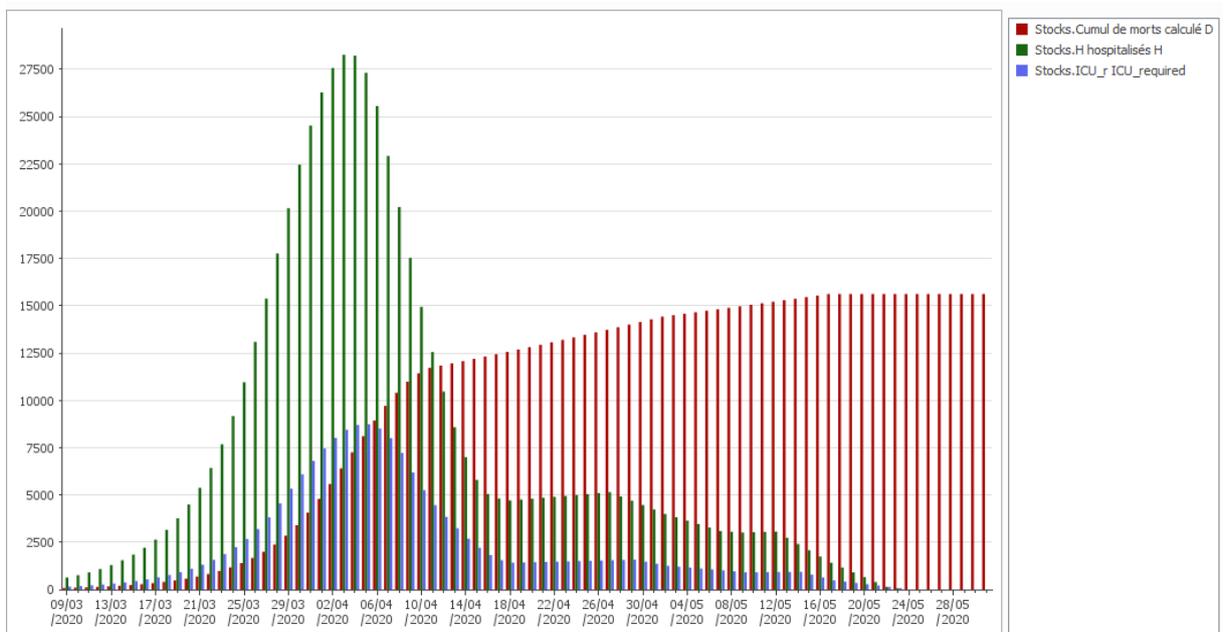
D'après ce modèle (résultats à prendre avec précautions), le pic des hospitalisations serait le 3 avril avec 29000 personnes hospitalisées, dont 9000 en soins intensifs. Un total de 17 500 pourraient décéder.

Un zoom sur le pic facilite la lecture :

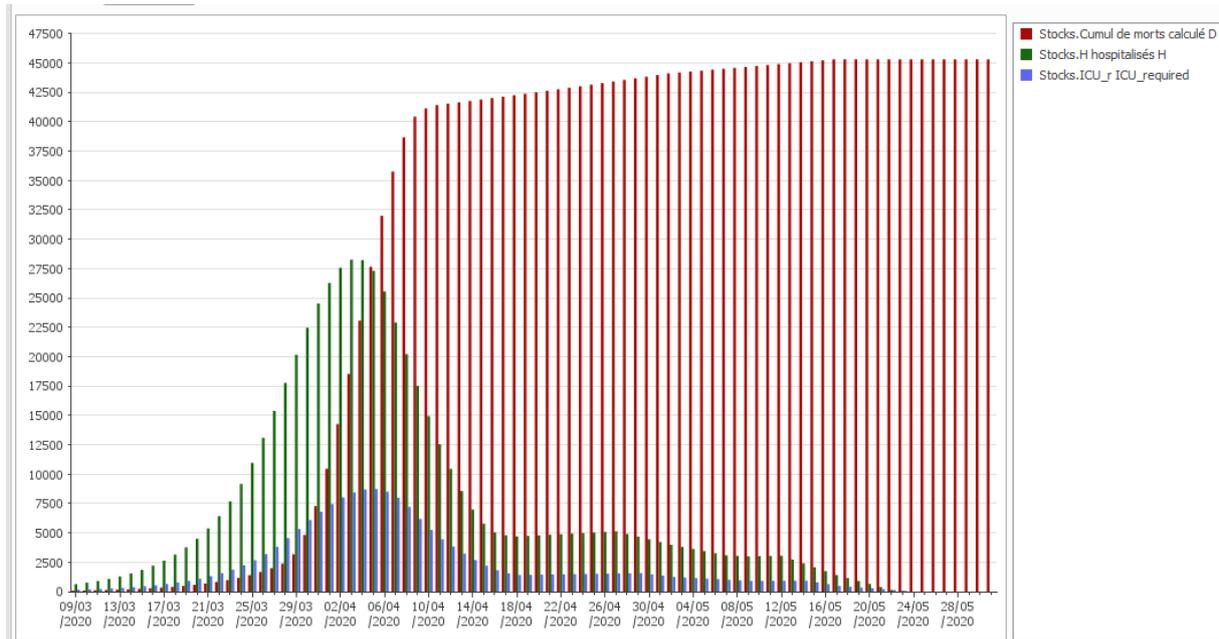


L'imprécision du modèle , et le manque de visibilité sur l'évolution du nombre d'ICU's disponibles selon la date (5000 initialement, 50000 annoncés fin avril) ne permet pas de dire si le seuil du nombre d'ICU's disponibles sera atteint ou dépassé, et ce facteur a un très fort impact sur le nombre de décès D par effet de seuil.

Si le nombre d'ICU devait augmenter à 10000 très rapidement, 'après ce modèle, le nombre de D diminuerait à 15 000 environ.



A l'inverse, une limitation du nombre de ICU's à 5000 augmenterait d'après le modèle de façon significative à ~ 40 000.



Résultat 3 : le modèle peut intégrer les effets de seuil liés à la saturation des moyens de soins (ICU's dans le cas de COVID-19) .

Attention : il ne s'agit pas ici d'une prévision, mais d'une modélisation sur les effets de seuil.

6 JEUX DE PARAMETRES

Le tableau ci-dessous présente les paramètres identifiés par pays suivi.

	France	Italy	Germany	US	China	Spain	Iran	United Kingdom	Korea, South	Switzerland
Taux de diffusion R0	2.340	2.88	2.34	3.36	3.000	3.12	3.12	2.22	2.4	3.12
Taux de diffusion Rc en confinement	0.120	0.227	0.177	0.480	0.108	0.240	0.240	0.240	0.120	0.360
Alpha Taux de détection	50.00%	20%	75%	20%	60%	20%	20%	20%	50%	40%
Gamma taux plafond par immunisation	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%
Proportion maxi infectable et détectable	25%	10%	38%	10%	30%	10%	10%	10%	25%	20%
Population max infectable et détectable Pi	16,750,000	6,000,000	31,087,500	32,716,700	360,000,000	4,672,300	8,180,000	6,650,000	12,925,000	1,693,200
Infection 0	24/1/20	31/1/20	27/1/20	15/2/20	5/1/20	1/2/20	19/2/20	31/1/20	22/1/20	25/2/20
Taux de croissance Tau_1	19.5%	24.0%	19.5%	28.0%	25.0%	26.0%	26.0%	18.5%	20.0%	26.0%
Temps depuis jour Infection 1 à D0	18	1	14	9	10	4	2	12	10	-
Date Start D0	11/2/2020	1/2/20	10/2/20	24/2/20	15/1/20	5/2/20	21/2/20	12/2/20	1/2/20	25/2/20
Nb J avant confinement Tnc	34	38	38	29	8	38	38	40	26	21
Date début confinement Dc	16/3/2020	10/3/20	19/3/20	24/3/20	23/1/20	14/3/20	21/2/20	23/3/20	27/2/20	17/3/20
Temps de réponse confinement Tr	10.00	6.00	7.00	10.00	14.00	5.00	5.00	10.00	5.00	6.00
Durée UP en J	44	44	45	39	22	43	0	50	31	27
Date D1 fin UP	26/03/20	16/03/20	26/03/20	03/04/20	06/02/20	19/03/20	21/02/20	02/04/20	03/03/20	23/03/20
Durée de la transition croissance vers confinement Tcc	12	12	12	20	15	12	12	12	10	12
Pente de la transition croissance vers confinement	-1.54%	-1.84%	-1.50%	-1.20%	-1.61%	-2.00%	-2.00%	-1.38%	-1.90%	-1.92%
Date D1c atteinte du taux de confinement	07/04/20	28/03/20	07/04/20	23/04/20	21/02/20	31/03/20	04/03/20	14/04/20	13/03/20	04/04/20
Taux de croissance Tau_c confinement D1c à D2	1.0%	1.9%	1.5%	4.0%	0.9%	2.0%	2.0%	2.0%	1.0%	3.0%
Date début palier D2	27/04/20	15/04/20	25/04/20	03/05/20	25/02/20	18/04/20	22/03/20	27/04/20	02/04/20	22/04/20
Durée du palier en J Tp	15	25	25	25	25	25	25	25	25	25
Taux de croissance Tau_P en palier	0.5%	0.0%	0.5%	0.5%	0.5%	0.5%	0.5%	0.3%	0.5%	0.5%
Date fin palier D3	12/05/20	10/05/20	20/05/20	28/05/20	21/03/20	13/05/20	16/04/20	22/05/20	27/04/20	17/05/20
a asymptomatiques	20.0%	20.0%	20.0%	20.0%	20.0%	20.0%	20.0%	20.0%	20.0%	20.0%
b malades bénins	20.0%	30.0%	50.0%	35.0%	40.0%	30.0%	60.0%	30.0%	60.0%	40.0%
h hospitalisés	60.0%	50.0%	30.0%	45.0%	40.0%	50.0%	20.0%	50.0%	20.0%	40.0%
r hospitalisés nécessitant un ICU	45.0%	43.0%	35.0%	45.0%	35.0%	40.0%	5.0%	45.0%	20.0%	40.0%
g hospitalisés non ICU guéris	55.0%	57.0%	65.0%	55.0%	65.0%	60.0%	95.0%	55.0%	80.0%	60.0%
gt part du total guéri après hospitalisation	33.0%	28.5%	19.5%	24.8%	26.0%	30.0%	19.0%	27.5%	16.0%	24.0%
rt part du total en réanimation ICU	27.0%	21.5%	10.5%	20.3%	14.0%	20.0%	1.0%	22.5%	4.0%	16.0%
d réanimés ICU décédés	54.0%	60.0%	15.0%	30.0%	30.0%	70.0%	30.0%	45.0%	30.0%	30.0%
dt part du total ICU décédé	14.6%	12.9%	1.6%	6.1%	4.2%	14.0%	0.3%	10.1%	1.2%	4.8%
ICUe guéris après ICU	46.0%	40.0%	85.0%	70.0%	70.0%	30.0%	70.0%	55.0%	70.0%	70.0%
gICU part du total guéri après ICU	12.4%	8.6%	8.9%	14.2%	9.8%	6.0%	0.7%	12.4%	2.8%	11.2%
Controle	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%
Ta temps de guérison a	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Tb temps de guérison b	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
Tr temps en réanimation	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
Number of ICUs	8000	7500	28000	20000	10000	5000	2000	7500	6000	10000
Country population	67,000,000	60,000,000	82,900,000	327,167,000	1,200,000,000	46,723,000	81,800,000	66,500,000	51,700,000	8,466,000
Nb infectés début confinement	6668	17899	15320	53740	575	6391	18	6650	1766	2700
Durée confinement Tc	33	30	30	30	20	30	30	25	30	30
Date fin confinement calculé D2	27/4/20	15/4/20	25/4/20	3/5/20	25/2/20	18/4/20	22/3/20	27/4/20	2/4/20	22/4/20
D2 pour 30j de confinement	15/4/20	9/4/20	20/4/20	22/4/20	20/2/20	13/4/20	29/4/20	22/4/20	6/3/20	1/5/20

On peut noter en particulier :

- Un R0 compris entre 2,16 (cas UK) et 3,48 (US), avec une valeur moyenne pour l'Europe de 2,3 (la valeur en Chine est ici trouvée égale à 6, tandis que la littérature publiée indique 2,6) ;
- Un Rc en phase de confinement autour de 0,2, soit environ 10 fois inférieur à R0 ;
- Un taux d'hospitalisés « h » qui varie fortement selon les pays : de 20% à 40%, ce qui peut s'expliquer par les différences de politiques de santé, et les différences d'équipement de santé entre les pays ;
- Un taux de létalité « d » après réanimation qui varie fortement selon les pays : de 15% pour l'Allemagne à 60% pour l'Italie ;
- Plus globalement, le modèle semble bien s'adapter aux différents pays, jusqu'à ce jour. Cela n'est évidemment pas une garantie de fiabilité pour les jours suivants.

7 PROJECTIONS

A titre informatif et sans aucun caractère prédictif, les résultats du modèle avec ses réglages actuels sont exposés ci-après pour un échantillon de pays.

Une grande incertitude entoure encore les politiques de confinement à venir pour les pays tels que les US, la Suisse ; la modélisation est donc incapable de se projeter sauf à laisser l'épidémie croître sans frein jusqu'à des nombres élevés de victimes.

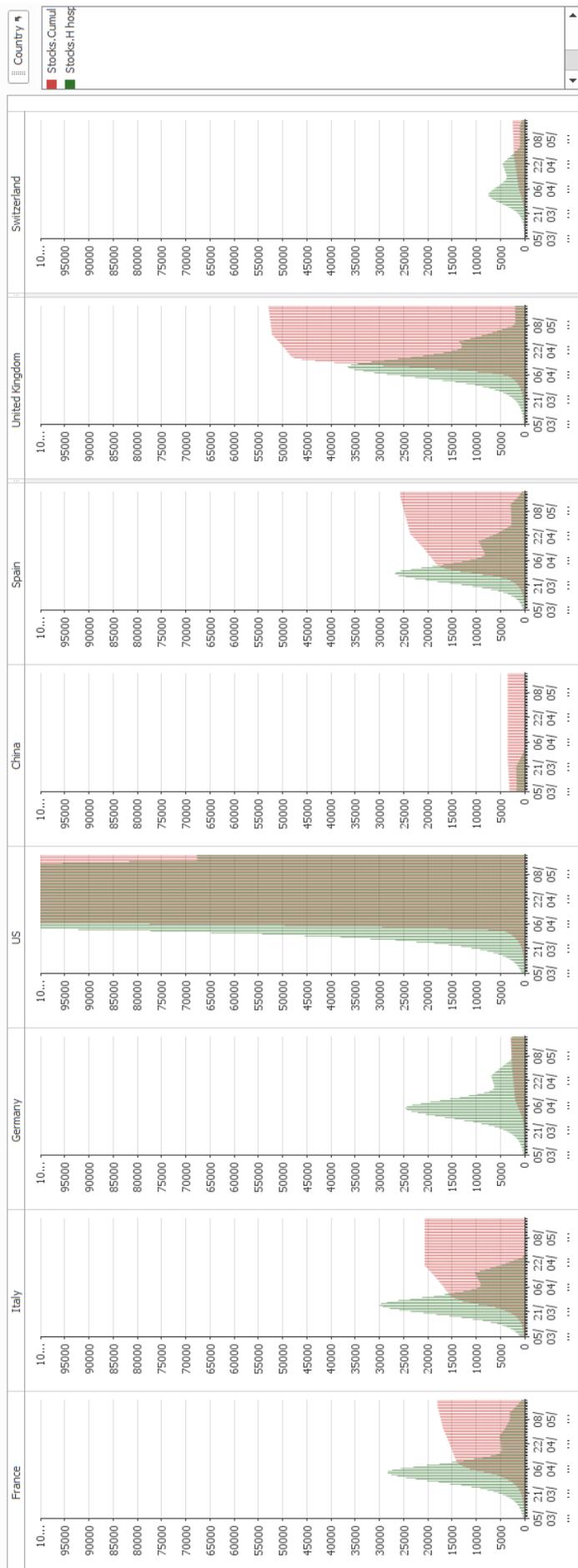
Le graphique ci-après représente pays par pays, les grandeurs suivantes : D, H, ICU_r.

Le nombre d'ICU_{max} par pays n'étant pas bien connu, l'impact sur le nombre de D est à prendre avec précaution.

On peut noter la grande variabilité des projections selon l'élément clef : la valeur de T_{nc} à savoir le temps de croissance de l'infection avant confinement. Les valeurs de D varient dans de très larges proportions d'après le modèle :

- Les « précurseurs » ne dépassent pas quelques milliers ;
- Les « pays en confinement » se situent autour de la dizaine de milliers ;
- Les « pays sans confinement ou à confinement tardif » dépassent plusieurs dizaines de milliers, voire (cas des US) pourraient dépasser quelques millions, mais les trajectoires peuvent encore sensiblement varier selon les décisions à venir (confinement, tests, efficacité de nouveaux traitements,...).

Ces résultats sont à prendre avec beaucoup de réserves à ce stade.



$T_{nc} = 21$

$T_{nc} = 40$

$T_{nc} = 38$

$T_{nc} = 8$

$T_{nc} = 50$

$T_{nc} = 38$

$T_{nc} = 38$

$T_{nc} = 34$

Résultat 4 : L'ampleur de la pandémie est très directement corrélée avec le délai de mise en place de mesures sanitaires fortes, en l'absence de moyens médicaux efficaces (vaccins, traitements).

8 LIMITES DE L'EXERCICE ET POINTS D'APPROFONDISSEMENT

Ce modèle tente de représenter en la simplifiant la complexité des phénomènes en jeu ; cette simplification peut conduire à des erreurs importantes.

En particulier, de fortes incertitudes entourent certaines hypothèses :

- Le R_c en phase de confinement, qui varie selon la taille moyenne des foyers confinés, la surface disponible par lieu de confinement et donc la probabilité P de transmission inter-confinés, l'isolation en amont des personnes infectées en dehors des foyers, etc... ;
- Le taux α de détection qui dépend de la politique de chaque pays en matière de tests ;
- Le taux d'hospitalisation (h) et de réanimation (r) par pays, données qui ne sont pas accessibles facilement et régulièrement pays par pays ;
- Le nombre d'ICU's disponibles par pays, donnée peu publiée ;

Chacun de ces sujets serait à approfondir par une étude spécifique.

Il est probable que « *a posteriori* » il sera possible d'affiner le modèle par observation des trajectoires constatées des différentes grandeurs, et d'en tirer des enseignements pour d'autres futures pandémies. Le caractère prédictif fiable d'un tel modèle reste très incertain dans l'immédiat ; il ne peut donner que des ordres de grandeur ou des tendances.

L'aspect médical du traitement de la maladie n'est pas pris en compte dans cette modélisation : apparition d'un traitement, apparition d'un vaccin, ... , tandis que l'on peut espérer qu'une avancée médicale radicale puisse remettre en cause ces modèles et diminuer l'impact de la maladie.

9 REFERENCES

Je me suis inspiré des articles suivants :

- (1) Tomas PUIEYO : <https://medium.com/@tomaspueyo/coronavirus-the-hammer-and-the-dance-be9337092b56>
- (2) Zunyou WU & Jennifer McGoogan : Characteristics of and Important Lessons From the Coronavirus Disease 2019 (COVID-19) Outbreak in China
<https://jamanetwork.com/journals/jama/fullarticle/2762130>
- (3) <https://jamanetwork.com/journals/jama/pages/coronavirus-alert#epidemiology>
- (4) https://www.thelancet.com/coronavirus?hss_channel=tw-27013292
- (5) Real estimates of mortality following COVID-19 infection
[https://www.thelancet.com/journals/laninf/article/PIIS1473-3099\(20\)30195-X/fulltext](https://www.thelancet.com/journals/laninf/article/PIIS1473-3099(20)30195-X/fulltext)
- (6) Nowcasting and forecasting the potential domestic and international spread of the 2019-nCoV outbreak originating in Wuhan, China: a modelling study
[https://www.thelancet.com/journals/lancet/article/PIIS0140-6736\(20\)30260-9/fulltext](https://www.thelancet.com/journals/lancet/article/PIIS0140-6736(20)30260-9/fulltext)
- (7) Substantial undocumented infection facilitates the rapid dissemination of novel coronavirus (SARS-CoV2)
<https://science.sciencemag.org/content/early/2020/03/24/science.abb3221.full>
https://science.sciencemag.org/content/sci/suppl/2020/03/13/science.abb3221.DC1/abb3221_Li_SM.pdf
- (8) The psychological impact of quarantine and how to reduce it: rapid review of the evidence
[https://www.thelancet.com/journals/lancet/article/PIIS0140-6736\(20\)30460-8/fulltext](https://www.thelancet.com/journals/lancet/article/PIIS0140-6736(20)30460-8/fulltext)
- (9) La source de données brutes utilisée pour ma modélisation
<https://github.com/CSSEGISandData/COVID-19>
<https://virusncov.com/>
- (10) Une visualisation des données brutes:
<https://data.humdata.org/dataset/novel-coronavirus-2019-ncov-cases#>
https://public.tableau.com/profile/covid.19.data.resource.hub#!/vizhome/COVID-19Cases_15840488375320/COVID-19Cases
- (11) Modéliser la propagation d'une épidémie par F Rechenmann
<https://interstices.info/modeliser-la-propagation-dune-epidemie/>

10 ANNEXES

Pour ceux que cela intéresse ou qui pourront chercher les erreurs résiduelles dans le modèle, je livre ici la totalité des calculs mis en œuvre.

Calculs associés à la matrice « Hypothèses country » :

✓ 1. Date fin palier D3 = Date début palier D2+Durée du palier en J Tp
✓ 2. a asymptomatiques = 20%
✓ 3. b malades bénins = 1-a asymptomatiques-h hospitalisés
✓ 4. $h \text{ hospitalisés} = 1 - (a \text{ asymptomatiques} + b \text{ malades bénins})$
✓ 5. Controle = a asymptomatiques+b malades bénins*dt part du total ICU décédé+gICUe part du total guéri après ICU*gt part du total guéri après hospitalisation
✓ 6. Ta temps de guérison a = 1
✓ 7. Tb temps de guérison b = 12
✓ 8. Date D1 fin UP=Date début confinement Dc+Temps de réponse confinement Tr
✓ 9. Pente de la transition croissance vers confinement = (Taux de croissance Tau_C confinement D1c à D2-Taux de croissance Tau_1)/Durée de la transition croissance vers confinement Tcc
✓ 10. Temps depuis jour Infection l à D0 = Date Start D0-Infection 0
✓ 11. Date fin confinement calculé D2 = Date D1 fin UP+Durée confinement Tc
✓ 12. Nb infectés début confinement= <code>select</code> (Données linéaires from csse::Confirmed:'23/01/2020' .. Confirmed:'31/05/2020';Données linéaires from csse::DATE2;Date début confinement Dc)
✓ 13. g hospitalisés non ICU guéris =1-r hospitalisés nécessitant un ICU
✓ 14. Taux de diffusion R0 = Taux de croissance Tau_1*Tb temps de guérison b
✓ 15. rt part du total en réanimation ICU = r hospitalisés nécessitant un ICU*h hospitalisés
✓ 16. gt part du total guéri après hospitalisation = g hospitalisés non ICU guéris*h hospitalisés
✓ 17. dt part du total ICU décédé = d réanimés ICU décédés*rt part du total en réanimation ICU
✓ 18. ICUe guéris après ICU = 1-d réanimés ICU décédés
✓ 19. gICUe part du total guéri après ICU = ICUe guéris après ICU*rt part du total en réanimation ICU
✓ 20. Durée UP en J = Date D1 fin UP-Date Start D0
✓ 21. Date D1c atteinte du taux de confinement = <code>if</code> ((Date D1 fin UP+Durée de la transition croissance vers confinement Tcc)<=Date début palier D2;Date D1 fin UP+Durée de la transition croissance vers confinement Tcc;Date début palier D2)
✓ 22. Taux de diffusion Rc en confinement = Taux de croissance Tau_C confinement D1c à D2*Tb temps de guérison b
✓ 23. Date début palier D2 = Date fin confinement calculé D2
✓ 24. Population max infectable et détectable Pi = Proportion maxi infectable et détectable*Country population
✓ 25. Date début confinement Dc = Date Start D0+Nb J avant confinement Tnc
✓ 26. Proportion maxi infectable et détectable = Alpha Taux de détection*Gamma taux plafond par immunisation
✓ 27. Gamma taux plafond par immunisation = 50%

Calculs associés à la matrice des flux :

1. Confirmed=Data Import Matrix::Status using Data Import Matrix::Country AS Country , Data Import Matrix::Status as Items
2. Delta C_calculated:DATE[THIS]='Infected_calculated_documented (Id)':DATE[THIS]- 'Infected_calculated_documented (Id)!DATE[PREV] skip DATE[FIRST], DATE[LAST]
3. Deaths= Data Import Matrix::Status USING Data Import Matrix::Country AS Country, Data Import Matrix::Status as Items
4. 'Delta_Deaths_confirmed(t)!:DATE[THIS]=if(Deaths>0;Deaths:DATE[THIS]-Deaths:DATE[PREV];0)
5. Month=month(datevalue(@DATE))
6. Day= day(datevalue(@DATE))
7. DATE2=datevalue(@DATE)
8. Coef croissance=and(if (DATE2>=Hypothèses country::Date Start D0,1,0),if (DATE2<=Hypothèses country::Date D1 fin UP,1,0))
9. Coef confinement=if (AND (DATE2>Hypothèses country::Date D1 fin UP+Hypothèses country::Durée de la transition croissance vers confinement Tcc;DATE2<=(Hypothèses country::Date début palier D2));1,0)
10. Coef palier= and (DATE2>Hypothèses country::Date début palier D2,DATE2<Hypothèses country::Date fin palier D3)
11. Coef transition croissance vers confinement=if (and (DATE2>Hypothèses country::Date D1 fin UP,DATE2<=Hypothèses country::Date D1 fin UP+Hypothèses country::Durée de la transition croissance vers confinement Tcc),1,0)
12. Taux de croissance=Coef croissance*Hypothèses country::Taux de croissance Tau_1+Coef palier*Hypothèses country::Taux de croissance Tau_P en palier+Coef transition croissance vers confinement*(Hypothèses country::Taux de croissance Tau_1+Hypothèses country::Pente de la transition croissance vers confinement*(DATE2-Hypothèses country::Date D1 fin UP))+Coef confinement*Hypothèses country::Taux de croissance Tau_C confinement D1c à D2
13. France:'Infected_calculated_documented (Id)':DATE[THIS]=France:'Infected_calculated_documented (Id)':DATE[PREV]*(1+France:Taux de croissance*France:'Not_infected Susceptible (S)':DATE[PREV]/Hypothèses country::France:Population max infectable et détectable Pi) skip '11/02/2020' /* France seulement */
14. Italy:'Infected_calculated_documented (Id)':DATE[THIS]=Italy:'Infected_calculated_documented (Id)':DATE[PREV]*(1+Italy:Taux de croissance*Italy:'Not_infected Susceptible (S)':DATE[PREV]/Hypothèses country::Italy:Population max infectable et détectable Pi) skip '01/02/2020' /* Italy seulement */
15. China:'Infected_calculated_documented (Id)':DATE[THIS]=China:'Infected_calculated_documented (Id)':DATE[PREV]*(1+China:Taux de croissance*China:'Not_infected Susceptible (S)':DATE[PREV]/Hypothèses country::China:Population max infectable et détectable Pi) skip '23/01/2020' /* Chine seulement */

```

16. Germany:'Infected_calculated_documented (
  Id):DATE[THIS]=Germany:'Infected_calculated_documented (
  Id):DATE[PREV]*(1+Germany:Taux de croissance*Germany:'Not_infected Susceptible
  (S):DATE[PREV]/Hypothèses country::Germany:Population max infectable et
  détectable Pi) skip '10/02/2020' /* Germany seulement */

17. US:'Infected_calculated_documented (
  Id):DATE[THIS]=US:'Infected_calculated_documented ( Id):DATE[PREV]*(1+US:Taux
  de croissance*US:'Not_infected Susceptible (S):DATE[PREV]/Hypothèses
  country::US:Population max infectable et détectable Pi) skip '05/02/2020' /*
  US seulement */

18. Spain:'Infected_calculated_documented (
  Id):DATE[THIS]=Spain:'Infected_calculated_documented (
  Id):DATE[PREV]*(1+Spain:Taux de croissance*Spain:'Not_infected Susceptible
  (S):DATE[PREV]/Hypothèses country::Spain:Population max infectable et
  détectable Pi) skip '05/02/2020' /* Spain seulement */

19. United Kingdom:'Infected_calculated_documented ( Id):DATE[THIS]=United
  Kingdom:'Infected_calculated_documented ( Id):DATE[PREV]*(1+United
  Kingdom:Taux de croissance*United Kingdom:'Not_infected Susceptible
  (S):DATE[PREV]/Hypothèses country::United Kingdom:Population max infectable et
  détectable Pi) skip '12/02/2020' /* UK seulement */

20. 'Korea, South':'Infected_calculated_documented ( Id):DATE[THIS]='Korea,
  South':'Infected_calculated_documented ( Id):DATE[PREV]*(1+'Korea, South':Taux
  de croissance*'Korea, South':'Not_infected Susceptible
  (S):DATE[PREV]/Hypothèses country::'Korea, South':Population max infectable et
  détectable Pi) skip '01/02/2020' /* Chine seulement */

21. Switzerland:'Infected_calculated_documented (
  Id):DATE[THIS]=Switzerland:'Infected_calculated_documented (
  Id):DATE[PREV]*(1+Switzerland:Taux de croissance*Switzerland:'Not_infected
  Susceptible (S):DATE[PREV]/Hypothèses country::Switzerland:Population max
  infectable et détectable Pi) skip '25/02/2020' /* Switzerland seulement */

22. Iran:'Infected_calculated_documented (
  Id):DATE[THIS]=Iran:'Infected_calculated_documented (
  Id):DATE[PREV]*(1+Iran:Taux de croissance*Iran:'Not_infected Susceptible
  (S):DATE[PREV]/Hypothèses country::Iran:Country population) skip '21/02/2020'
  /* Iran seulement */

23. 'Not_infected Susceptible (S)≠Hypothèses country::Population max infectable et
  détectable Pi-'Infected_calculated_documented ( Id)-Cumul de morts calculé D

24. Temps depuis la 1ère infection= if (DATE2-Hypothèses country::Country:Infection
  0>=0, DATE2-Hypothèses country::Country:Infection 0,0)

25. delta C asymptomatiques = Delta C_calculated*Hypothèses country::a
  asymptomatiques

26. delta C a après Ta:DATE[THIS]=delta C asymptomatiques:DATE[THIS] /* Ta = 1 */

27. delta C bénins = Delta C_calculated*Hypothèses country::b malades bénins

28. delta C b guéris après Tb:DATE[THIS]=delta C bénins:DATE[PREV+1] /* Tb = 0 */

```

29. $\Delta C_h \text{ hospitalisés} = \Delta C_{\text{calculated}} * \text{Hypothèses country:} : h \text{ hospitalisés}$
30. $\Delta C_h \text{ hospitalisés non ICU guéris après Tb:DATE[THIS]} = \Delta C_h \text{ hospitalisés après Tb:DATE[PREV-9]} * \text{Hypothèses country:} : g \text{ hospitalisés non ICU guéris}$
31. $\Delta C_h \text{ hospitalisés après Tb:DATE[THIS]} = \Delta C_h \text{ hospitalisés:DATE[THIS]}$
32. $\Delta c \text{ nécessitant un ICU:DATE[THIS]} = \Delta C_h \text{ hospitalisés après Tb:DATE[PREV-1]} * \text{Hypothèses country:} : r \text{ hospitalisés nécessitant un ICU}$
33. $\Delta C_r \text{ guéris après ICU après Tb:DATE[THIS]} = \Delta c \text{ nécessitant un ICU:DATE[PREV-9]} * \text{Hypothèses country:} : \text{ICUe} \text{ guéris après ICU}$
34. $\Delta C_r \text{ morts après ICU après Tb:DATE[THIS]} = \Delta c \text{ nécessitant un ICU:DATE[PREV-2]} * \text{Hypothèses country:} : d \text{ réanimés ICU décédés}$
35. $\Delta R \text{ all recovered} = \Delta C_a \text{ après Ta} + \Delta C_b \text{ guéris après Tb} + \Delta C_h \text{ hospitalisés non ICU guéris après Tb} + \Delta C_r \text{ guéris après ICU après Tb}$
36. $\Delta C \text{ morts par manque de ICU} = \text{if}(\text{ICU}_r - \text{ICU}_{\text{required}} - \text{ICU}_{\text{disponibles}} > 0, \text{ICU}_r - \text{ICU}_{\text{required}} - \text{ICU}_{\text{disponibles}}, 0)$
37. $\Delta C \text{ Out} = \Delta R \text{ all recovered} + \Delta C_r \text{ morts après ICU après Tb} + \Delta C \text{ morts par manque de ICU}$
38. $\Delta C - \Delta C \text{ Out} = \Delta C_{\text{calculated}} - \Delta C \text{ Out}$
39. $\Delta C_{\text{Confirmed}}(t) : \text{DATE[THIS]} = \text{if}(\text{Confirmed} > 0; \text{Confirmed:DATE[THIS]} - \text{Confirmed:DATE[PREV]}; 0)$
40. $\text{Stocks.Stock malades:DATE[THIS]} = \text{Stocks.Stock malades:DATE[PREV]} + \Delta C_{\text{calculated:DATE[THIS]}} - \Delta C_a \text{ après Ta} - \Delta C_b \text{ guéris après Tb:DATE[THIS]} - \Delta C_h \text{ hospitalisés non ICU guéris après Tb:DATE[THIS]} - \Delta C_r \text{ guéris après ICU après Tb:DATE[THIS]} - \Delta C_r \text{ morts après ICU après Tb:DATE[THIS]}$
41. $\text{Cumul de morts calculé D:DATE[THIS]} = \text{Cumul de morts calculé D:DATE[PREV]} + \Delta C_r \text{ morts après ICU après Tb:DATE[THIS]} + \Delta C \text{ morts par manque de ICU:DATE[THIS]}$
42. $\Delta D(t) = \Delta C \text{ morts par manque de ICU} + \Delta C_r \text{ morts après ICU après Tb}$
43. $H \text{ hospitalisés H:DATE[THIS]} = H \text{ hospitalisés H:DATE[PREV]} + \Delta C_h \text{ hospitalisés après Tb:DATE[THIS]} - \Delta C_h \text{ hospitalisés non ICU guéris après Tb:DATE[THIS]} - \Delta C_r \text{ guéris après ICU après Tb:DATE[THIS]} - \Delta C_r \text{ morts après ICU après Tb:DATE[THIS]}$
44. $\text{Start Date D0} = \text{Hypothèses country:} : \text{Date Start D0}$
45. $\text{Pcg of population infected} = \text{Infected}_{\text{calculated_documented}}(\text{Id}) / \text{Hypothèses country:} : \text{Country population}$
46. $\text{ICU disponibles} = \text{Hypothèses country:} : \text{Number of ICUs}$

47. $ICU_r = \max(ICU_r, ICU_required + \Delta C - \Delta C_r - \Delta C_m)$
nécessitant un ICU-delta C r guéris après ICU après Tb-delta C r morts après ICU après Tb, 0)
48. Modèle SIR. Stock Malades: $DATE[THIS] = \text{Modèle SIR. Stock Malades: DATE[PREV]} + \text{Modèle SIR. Stock Malades: DATE[PREV]} * (\text{Hypothèses country: : Taux de diffusion } R_0 \text{ pour SIR/Hypothèses country: : Tb temps de guérison } b) * \text{Stock Sains: DATE[PREV]} / \text{Hypothèses country: : Country population} - \text{Modèle SIR. Stock Malades: DATE[PREV]} / \text{Hypothèses country: : Tb temps de guérison } b - \text{Modèle SIR. Stock Malades: DATE[PREV]} * \text{Hypothèses country: : Taux de létalité pour SIR/Hypothèses country: : Tb temps de guérison } b$ skip '24/02/2020'
49. Stock Guéris: $DATE[THIS] = \text{Stock Guéris: DATE[PREV]} + \text{Modèle SIR. Stock Malades: DATE[PREV]} / \text{Hypothèses country: : Tb temps de guérison } b$ skip '24/02/2020'
50. Stock Morts: $DATE[THIS] = \text{Stock Morts: DATE[PREV]} + \text{Modèle SIR. Stock Malades: DATE[PREV]} * \text{Hypothèses country: : Taux de létalité pour SIR/Hypothèses country: : Tb temps de guérison } b$ skip '24/02/2020'
51. Stock Infectés = Stock Guéris + Stock Morts
52. Stock Sains = $\text{Hypothèses country: : Country population} - \text{Modèle SIR. Stock Malades} - \text{Stock Guéris} - \text{Stock Morts}$
53. 'Infected_calculated_Undocumented (Iu)!Country = 'Infected_calculated_documented (Id)!Country * (1 - Hypothèses country: : Alpha Taux de détection) / (Hypothèses country: : Alpha Taux de détection)
54. 'I = Ic + Id Total_infected_calculated' = 'Infected_calculated_documented (Id) '+' Infected_calculated_Undocumented (Iu)'
55. 'Taux de létalité ramené à Ic+Id' = Cumul de morts calculé D / 'I = Ic + Id Total_infected_calculated'
56. Taux de létalité ramené à la population totale = Cumul de morts calculé D / Hypothèses country: : Country population
57. ICU_e Nb of patients equipped with ICU = $\min(ICU \text{ disponibles}, ICU_r \text{ ICU_required})$