

Covid19 et Génie des Procédés...

Covid19 and Process Engineering

Nicolas Reversat¹, Jean Claude André¹

¹ LRGP – UMR7274 CNRS-UL, 1, rue Grandville F54000 Nancy

RÉSUMÉ. Depuis deux ans environ, nous subissons l'effet de la pandémie liée au SARS-COV-2 [Covid-19]. Désarmés, les politiques dans leurs discours sont passés du thème d'une grippe ordinaire, sans effets majeurs, à des obligations de prévention plus crédibles, parfois avec du retard. La France comptabilise aujourd'hui plus de 130000 morts ! Toute la société (dont des scientifiques), dans le flou ambiant, a ajouté sa vision et ses propres propositions, ce qui n'a rien arrangé. En utilisant (pour l'essentiel) des méthodes de résolution d'équations différentielles classiques, on retrouve la plupart des couplages entre virus (croissance, exposition, disparition) et individus (malades, immunisés, etc.), déjà validés scientifiquement. Des tendances issues de cette modélisation semi-quantitative valident nombre d'effets : distanciation sociale, gestes barrières, qualité du masque, intérêt du télétravail, etc. En revanche, malgré le discours du politique, validé par son conseil scientifique, il est possible que la vaccination ne serve pas à réduire la pandémie si les vaccinés (protégés des effets les plus graves) réémettent du virus, même en petites quantités. De même, l'existence d'une immunité collective n'est pas prouvée...

ABSTRACT. For about two years, we have been suffering from the effect of the SARS-COV-2 pandemic [Covid-19]. Distracted, politicians in their speeches have gone from the theme of an ordinary flu, without major effects, to more credible prevention obligations, sometimes with delay. France counts today more than 130,000 deaths! All the society (including scientists), in the ambient vagueness, added its vision and its own proposals, which did not arrange anything. By using (for the most part) methods of solving classical differential equations, we find most of the couplings between viruses (growth, exposure, disappearance) and individuals (sick, immunized, etc.), already scientifically validated. Trends resulting from this semi-quantitative modeling validate a number of effects: social distancing, barrier gestures, mask efficiency, interest in teleworking, etc. On the other hand, in spite of the political rhetoric, validated by its scientific council, it is possible that vaccination will not serve to reduce the pandemic if the vaccinated (protected from the most serious effects) re-emit the virus, even in small quantities. Similarly, the existence of a collective immunity is not proven...

MOTS-CLÉS. Dynamique de propagation, pandémie, prévention, modélisation, méthode différentielle, méthode stochastique.

KEYWORDS. Propagation dynamics, pandemic, prevention, modeling, differential method, stochastic method.

« Un mal qui répand la terreur,
Mal que le Ciel en sa fureur
Inventa pour punir les crimes de la terre,
La Peste (puisqu'il faut l'appeler par son nom)
Capable d'enrichir en un jour l'Achéron,
Faisait aux animaux la guerre.

Ils ne mouraient pas tous, mais tous étaient frappés » (in « Les Animaux malades de la peste » La Fontaine).

« C'est la théorie de la « réactance » qui nous pousse à mettre en œuvre des ressources intellectuelles et une énergie considérable pour recouvrer cette liberté » (Marchand, 2022).

« Imaginer que l'on va se sortir de la crise Covid par le tout vaccinal est illusoire. Toutes les données montrent que ce n'est pas possible » (Costagliola, 2022).

« Le variant omicron est beaucoup plus dangereux, mais moins sévère que ses prédécesseurs » (Castex, Premier Ministre, 2022) !

Introduction

« L'économie était une chaîne linéaire qui avançait pour son propre compte. Elle imposait ses cadences et prescrivait ses diktats. Jusqu'alors, on nous disait qu'il était impossible de stopper le capitalisme. Or, en quelques jours, tout ce qui était impossible est devenu possible. Les avions sont restés à terre, les embouteillages se sont dissipés et les écoles se sont fermées. Les parents ont pris soin de leurs enfants et les animaux, les oiseaux, les poissons aussi sont réapparus dans les villes. A ce même moment, la moitié de l'humanité a été confinée, ce qui n'était jamais arrivé dans l'histoire. Certes, cette situation a été terrible, mais elle a également été une bonne nouvelle, car cet évènement a déclaré la possibilité de l'impossible » (Dallaporta, 2021). Et cela fait deux ans au moins que nous subissons à la fois la pandémie de Covid-19 qui viendrait de Chine et des conditions de pertes de libertés imposées par la plupart des Etats occidentaux pour tenter de trouver des voies de protection des citoyens.

Dans les situations incertaines où il ne peut y avoir consensus entre les scientifiques par absence de connaissances et parce qu'il est difficile de faire converger sérieusement des savoirs disciplinaires disjoints, sous la pression de demandeurs pressés, l'expertise approfondie est pratiquement impossible, l'affichage d'une vérité relève de l'exploit, de l'angélisme ou de la malhonnêteté (ou d'un peu des trois à la fois, parce que l'ego de certains se satisfait de « passer » à la télévision). De plus, les modèles épidémiologiques sont mis en cause (Rouchier, 2022) et les prévisions précises impossibles par manques de données fiables... Rappelons-nous qu'en mars 2020, nous avons été confinés, il nous a été signalé que la généralisation du port d'un masque n'était pas nécessaire et un mois plus tard il était fortement recommandé, et ce, que l'on soit malade ou pas... Ce flou se retrouve aussi sur le versant scientifique : Ainsi, selon Marchard (2022), 157 articles sur le thème Covid-19 publiés entre le 1er janvier 2020 et le 10 octobre 2021 auraient été retirés de la littérature scientifique et 8 d'entre eux impliqueraient des chercheurs travaillant en France ! Tout cela dans un chaos auto-amplifié par les pouvoirs et les chaînes d'information non approfondie, ce qui rend la démocratie bien fragile avec des prises de décisions peu robustes, face à certains populismes ou à certaines idéologies réductrices, mais tonitruantes et parfois (souvent ?) bien orchestrées. Dans ces conditions, nous devenons de plus en plus sensibles à certains mauvais côtés qui posent fortement question : mondialisation, circulation du virus, cybercriminalité, pollutions, etc. pour lesquels beaucoup de choses restent à faire... Le procès d'intention est proche !

Faire des choix, c'est ce que nous faisons en permanence. Mais qu'en est-il quand des décisions doivent être prises de manière plus globale et plus sérieuse ? Quand elles résultent de crises ou de pandémies ? Il y a certes des aspects factuels non discutables, des éléments rationnels permettant le débat ainsi qu'une « bonne » dose d'émotions et de perceptions diverses liées au moment... Pour Lavis (2021) : « C'est par peur de cet imprévu et de son pouvoir déroutant que l'on renforce les protocoles méthodologiques. Mais plus on les renforce, plus la survenue de l'imprévu devient paralysante ». A ces éléments naturels et psychologiques déjà complexes s'ajoutent parfois différents biais intentionnels qui perturbent l'expertise (avant toute décision), soit en interne, soit en externe, permettant aux décideurs de proposer des avis que la société dans son ensemble devra suivre. Ainsi, à la manière d'Esopo, l'expertise serait la meilleure et la pire des choses ! Mais, pour Simon (1969), la téléologie impliquée dans l'expertise doit réfléchir à la myopie des critères de sélection. Alors, l'évolution dans la démarche se ferait par sélection locale première d'éléments ayant un impact à court terme, plutôt que sur des critères plus flous, moins assurés, concernant le long terme (Tabb, 2007). Une question dans cette approche téléologique est d'examiner comment on réunit des savoirs disjoints pour les intégrer, ce qui constitue une autre source d'incertitude et de débats. Cette dernière doit prendre en considération des tensions et les conflits internes, parce que l'expertise peut contredire, pendant sa mise en forme, les croyances et les attentes de certains, ce qui impose du temps pour atteindre l'objectif avec un résultat partagé, non toujours consensuel.

Dans ce désordre ambiant, cette inquiétude pour aujourd'hui et demain, nombre de responsables politiques plus ou moins perdus dans la compréhension des problèmes, enkystés dans les pressions temporelles, font du « transfert de stress » en accusant les épaisseurs bureaucratiques qu'ils renforcent par de nouveaux « Comités » et de nouvelles « Commissions », ce qui finalement ralentit l'expertise. Leurs yeux sont rivés sur les graphiques des sondages, comme si l'opinion ayant atteint un certain consensus définissait la vérité et une corrélation, entre un choix et ses effets, était une causalité. Rappelons qu'une causalité peut être définie comme une tentative rationnelle d'élaboration d'une grille de lecture du réel, à visée explicative et vérifiable selon les critères définis par une science rationnelle. Cette explication doit déboucher naturellement sur l'établissement d'un diagnostic, d'une tendance, si possible univoque, qui n'a pas besoin dans une première phase d'avoir l'aval du public (syndrome de Galilée). Il est ainsi possible de lutter contre les fausses évidences, les propos « langue de bois » et pour la dé-coïncidence des mots et des choses... Mais, ce n'est pas toujours facile d'avoir raison contre une majorité puissante qui tient à conserver ses avantages ou qui ne croit plus aux messages, même vrais... (André, 2022).

« Après la tempête, le calme ? Alors que la vague Omicron a battu des records de contamination, la France pourrait amorcer la phase descendante de la cinquième flambée de Covid-19. « Il y a des raisons d'être optimistes », a jugé mardi 18 janvier sur CNews le porte-parole du gouvernement, Gabriel Attal, en s'appuyant sur « les déclarations d'un certain nombre de scientifiques » ces derniers jours. « Le scénario du pire s'éloigne, la décrue a commencé, le pic des infections a été passé ces jours-ci (...) en Île-de-France » et « ce sera un petit peu plus tard pour les autres régions françaises », relevait la veille sur France Inter l'épidémiologiste Arnaud Fontanet, membre du Conseil scientifique » (Brunet, 2022).

Pour la France, durant la première vague, entre une insuffisance de préparation de cette protection des citoyens, du storytelling discutable, la confiance des habitants a été fortement perturbée. En effet, la situation de ces trois éléments : risques liés au virus, protections proposées non stabilisées et perte de confiance peut être considérée comme très pesante, en particulier durant la première vague. Puis vint le vaccin partiellement sauveur, avec des discours biaisés, voir erronés, l'émergence de rejets vis-à-vis des différents vaccins avec de nombreuses « Fake News » issues du plus haut de certains grands états, parfois du corps médical, etc. A ce jour, cette pandémie serait responsable de 5 727 031 décès à l'échelle de la planète et 133202 pour la France (au 05-02-2022) selon John Hopkins (2022). Selon l'AFP (2022), citant l'OMS, en prenant en compte des surmortalités liées au virus, le bilan de la pandémie pourrait être deux à trois fois plus élevé que celui qui est officiellement établi. Dans ce même temps de la pandémie, à John Hopkins, Herby, Jonung, Hanke (2022) montreraient que la fermeture des bars aurait réduit le nombre des décès, mais il n'y aurait pas de preuve que les fermetures d'écoles, de frontières et que la limitation des rassemblements aient pu avoir un effet notable sur la mortalité due au Covid-19 ! A qui se fier ?

REMARQUE. Fake-News

Si, seulement 0.4% du temps total de connexion sur Internet correspond à la lecture de Fake-News selon Cordonier et Brest (2021), la désinformation sur Internet tirerait davantage son origine de l'usage des réseaux sociaux. Nombre d'« infox » autour du Covid-19, auraient été massivement diffusées sur Facebook ou sur Twitter. La figure 1, issue de ces auteurs, illustre la répartition des origines de ces informations fausses ou massivement déformées.

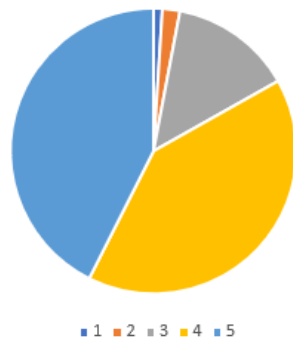


Figure 1. Répartition du temps passé sur des sources d'information non fiables (1 : Satire, 2 : Pseudo-sciences, 3 : Désinformation en santé, 4 : Pièges à clics, 5 : Désinformation généraliste)

Par ailleurs, Frédérique Bordignon et deux de ses collègues (Bordignon, Ermakova et Noel, 2021) analysant 24 000 publications parlent d'une explosion de pré-prints (Fraser et al, 2021) avec l'utilisation renforcée de mots positifs comme « robust », « impressive », « effective », « significant » ou encore « novel ». Les mots négatifs l'étaient encore moins. Seuls des termes relevant de l'incertitude étaient relevés. Les auteurs ont pu exagérer (texte et résultats) pour accrocher le lecteur intéressé et se démarquer des autres. Le risque d'infidélité serait alors possible.

« Avec l'étonnement, l'incertitude, puis le doute, la panique, la peur, la nécessité de prendre des mesures, de se protéger, de soigner, d'éviter, par des gestes barrières de propager la maladie, mais aussi, la volonté de trouver par de multiples recherches, un vaccin ou un traitement thérapeutique, sont au moment de la crise de la COVID 19, autant d'éléments qui, avec l'attitude des hommes et des femmes, obéissants, courageux, lâches ou insoucians, rappellent des modes de fonctionnement plus anciens » (Figeac-Monthus, 2021). Sensibilité nouvelle du public pour cette pandémie et ses effets mortels, la recherche de tous les moyens de protection (même les plus hasardeux, avec souvent un aspect de « chacun pour soi ») est un phénomène nouveau qui a plané sur ces deux premières années de la pandémie mondiale. Avec des hétérogénéités importantes des visions des citoyens sur le bien et le juste, avec le développement sans précédent de l'individualisme (Bourg et Schlegel, 2001), il n'y a donc demande sociale que sur des situations jugées alarmantes par des groupes constitués sur ce seul problème, c'est-à-dire, au fond quand il est presque trop tard.

Gauchet (2002) rappelle qu'« il convient de se demander si nous n'assistons pas à une de ces grandes oscillations que connaissent périodiquement les sociétés occidentales depuis l'invention des individus. Oscillations liées à la difficulté, si ce n'est à l'impossibilité, qu'elles éprouvent à penser ensemble individu et société, à recomposer une société à partir des individus ». En fait, les fractures devenues plus visibles malgré des efforts pour les masquer (avec le « quoiqu'il en coûte ») sont celles d'une nation qui a notablement changé depuis la fin des Trente Glorieuses, ne serait que dans la transition de la petite épicerie aux hypermarchés, etc. Celle-ci ressent sa perte de rayonnement international, sa faible capacité à maintenir un commerce normal avec les autres pays, etc. (Fourquet et Cassely, 2021). Et, en plus, on subit la crise liée au coronavirus (alors que comme le montre la figure 2, issue de l'OMS et citée par Pontoizeau, 2021, ni la létalité, ni la contagiosité du virus ne semblent très importantes) ! La focalisation d'une demande de changement s'opère très largement aujourd'hui sur d'autres effets réels (le nombre de morts par exemple) ou sur des impressions fortes qui atteignent l'individu (confinement strict par exemple). Pour reprendre un avis de Gauchet (2002), il est possible de considérer que la source des problèmes évoqués tient au fait que « distance et défiance sont les deux mamelles de l'individualisme contemporain ». Si, en plus, la relation entre administrés et politiques est perturbée négativement, tout vacille, d'autant plus que les informations robustes sont rares, tout est mené sous pression temporelle avec des validations parfois hasardeuses.

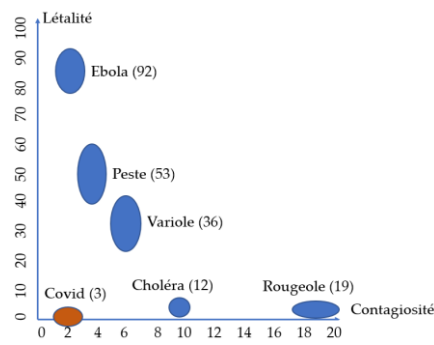


Figure 2. Létalité vs contagiosité de certaines pandémies

Selon Kahn (2022), la Commission Européenne, « comme des gouvernements européens, signale le fait que la société européenne se caractérise par une aversion au risque plus grande, et une appétence pour l'innovation ou pour la témérité moindre, qu'au Royaume-Uni, aux Etats-Unis ou même en Chine. On peut faire l'hypothèse que, démographiquement vieillissante, l'Europe est devenue un « pays » du monde plus prudent qu'ailleurs ». Par ailleurs, les industries comme les états qui en avaient la responsabilité ont été bien peu prudents, à courte vue et sans vision stratégique, ni anticipatrice. N'avons-nous pas entendu sur tous les médias d'information que depuis au moins quinze ans, la production de produits de santé (dont des masques et autres équipements de protection individuelle) n'avait pas été maintenue sur notre sol. Quand toute la planète demande au même moment ces masques, il ne faut pas s'étonner d'avoir une pénurie d'approvisionnement sur le territoire national et, consécutivement des informations peu crédibles de la part de ceux qui auraient dû anticiper les besoins de protection des populations dont ils ont la charge...

En tout état de cause, ces faits induisent une perte de confiance entre Science et Société (cf. par exemple, Blondel et al, 2021). C'est alors sur cette base que des recherches sont souhaitées avec une pression forte amenant à produire vite des solutions de prévention/protection : vaccins, équipements de protection individuelle, gestes barrières, etc. Il s'agit d'une tentative classique de remise en marche d'un système (un peu) grippé, on le graisse ou on le répare ! Or, cela signifie que le contexte vise à s'inscrire dans une dynamique rationnelle plutôt acceptable grâce aux retours à des méthodes éprouvées dans le passé. Il n'y a donc pas de remise en cause fondamentale des pratiques. Or, il ne faut pas oublier que l'humanité a déjà connu de nombreuses autres épidémies et pandémies qui ont fait un beaucoup plus grand nombre de morts relativement à la population, indépendamment des guerres. Mais, le cadre peut être considéré comme différent si l'on prend en considération le coup de « gueule » de Maurice (2021) qui écrit : « Deux ans à être gouvernés par la peur et l'infantilisation. Deux ans à être gouvernés par des apprentis médecins aux agendas obscurs et des épidémiologistes savants autodéclarés. Deux ans à être gouvernés par des gens totalement paniqués qui courent partout comme des poulets sans tête »...

Mutations après mutations, si d'autres épidémies consécutives ou de nouvelles peuvent menacer encore notre survie (indépendamment des effets du changement climatique), dans l'esprit de nombre de personnes, il faudrait savoir apprendre des expériences du passé afin de mieux appréhender le futur. Mais, quand les méthodes éprouvées ne sont plus adaptées au présent, à qui ou à quoi se fier ? Ces considérations « iconoclastes », sont favorisées par la difficulté d'évaluer l'efficacité des nombreuses obligations que les citoyens doivent respecter. Par exemple, certains pays, notamment scandinaves, enregistrent d'excellents taux de vaccination, alors qu'ils laissent la liberté à leurs citoyens. En Autriche, la vaccination anti-Covid est obligatoire pour tous (AFP, 2022 a). En Israël, on a commencé à injecter une quatrième dose de vaccin aux plus de 60 ans et au personnel soignant (Costagliola, 2022). En France, il y a, fin janvier, 300.000 contaminations journalières environ (Coladon, 2022) et, selon Meyer (2022), les indicateurs avancés par le ministre de la santé ne peuvent en aucun cas servir de repères sérieux au durcissement du « pass sanitaire », qui est entré en application au moment où certains auraient accepté de l'abandonner et de vivre avec le coronavirus

comme avec une épidémie de grippe... Omicron, le dernier variant en date, ne serait pas, pour Krishna (2022), le variant final, le dernier préoccupant selon la terminologie de l’OMS. Alors, le virus actuel pourrait devenir endémique, mutant lentement au fil du temps... C’est l’avis contraire de Alison et Sofonea (2021 ; 2021 a) pendant que Fontanet (2021) prône l’immunité collective liée au vaccin et que Subramanian et Kumar (2021) ont une position plus mitigée... Dans le domaine des traitements statistiques associé à cette vaccination, le paradoxe dit de Simpson est lié à des taux de vaccination variables d’une classe d’âge à l’autre : « il est donc important de comparer l’efficacité du vaccin à l’intérieur de chaque classe d’âge, qui possède des caractéristiques plus homogènes. Rassembler les différentes classes d’âge introduit ce que l’on appelle un « biais de sélection » » (Berger et Caravenna, 2021). Prudence donc, en milieu incertain...

REMARQUE. Pendant 6 semaines, une veille en français sur le sujet a été menée, ce qui a permis de recueillir plus de 300 liens internet, émanant soit de scientifiques et d’experts engagés dans la dynamique liée à des connaissances nécessaires pour la lutte contre le virus, soit des affirmations de politiques, soit enfin d’avis d’opposants à la politique menée ou d’idéologues subtils (profitant des lacs d’incertitude) ou producteurs de Fake-News (cf. De Villiers, 2021 ; Coladon, 2022 a). 47 pages de liens ont donc pu être collectées... Finalement, à qui se fier ? Réel leitmotif de ce document !

Mais ce libre choix laissé aux français est-il une cause ou une conséquence de la bonne volonté à se faire vacciner ? Autre difficulté, selon Up Magazine (2022), celle de définir précisément ce qui constitue une obligation. « A ce titre, la crise du Covid a vu émerger un nouveau concept, comme en France, celui du pass sanitaire ou vaccinal. Ce n’est pas une stricte obligation. Les citoyens gardent théoriquement le choix de se faire vacciner, mais s’ils ne le font pas, ils sont privés de nombreuses possibilités... Entre prévention et liberté ? Dans l’existence de processus oscillants (cf. les différentes vagues d’exposition présentées figure 3), il est sans doute difficile de disposer du temps de la réflexion sereine. De fait, dans les problèmes d’« acceptabilité », des préventions contre le virus de la part de la population sont liées à l’inertie des structures associée à la dynamique (positive ou négative) de l’information (vraie et stabilisée, incertaine, fausse volontairement (Fake-News)) conduisant à l’émergence d’inadaptations à la rationalité sociale. Il y aurait donc nécessité d’une analyse temporelle sur l’émergence d’un dispositif de preuves : intuition, présupposés, croyances, indices préliminaires, hypothèses extrêmes ou imaginaires (Chateauraynaud et Thorny, 1999). Hirsch (2002 ; 2004) a mis en lumière plusieurs types de crises dont celle qui intervient quand les dysfonctionnements sont réels, ce qui semble être le cas avec la pandémie... même le nombre d’hospitalisations décroît aujourd’hui ! Des manifestations de défiance consécutives, selon Hirsch, sont des moyens de moraliser les actions et de leur redonner du sens. C’est un peu ce que tentent de faire ceux qui rejettent la vaccination...

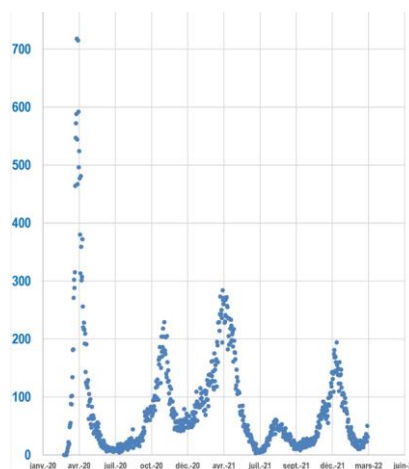


Figure 3. Nombre d’hospitalisations via les urgences pour suspicion de Covid-19 au 29-03-2022 (OSCOUR – IdF (Ile-de-France), 2022)

« Cherchant à établir des lois, la modélisation cherche des tendances, voire des régularités, en niant les faits uniques qui sortent du « sens commun ». Or, Taleb (2011) nous rappelle que l'on ne peut connaître le réel si on ignore « la puissance de l'imprévisible », c'est-à-dire si on ne tente pas à envisager des phénomènes rares, mais qui peuvent avoir un ou des effets très importants sur la société. C'est bien ce qui est arrivé en France en niant l'arrivée du coronavirus et de ses effets lors de la première vague alors que l'on aurait pu, au moins en partie, anticiper la crise » (Je vote pour la science, 2022).

Pour revenir au contexte dans lequel la société occidentale se trouve avec les différentes vagues d'exposition au virus et à ses variants divers, nous sommes passés d'une société industrielle pour laquelle l'objectif central était une certaine forme de répartition des richesses à une société centrée sur une autre forme de répartition, celle des risques. qui devient dès-lors un élément constitutif de la société. Il est d'une nature nouvelle et entraîne des redéfinitions des dynamiques sociales et politiques, s'appuyant sur une répartition nouvelle et hétérogène des risques et du développement de l'individualisation. Dans ces conditions, selon Beck (2003), « la science devient de plus en plus nécessaire, mais de moins en moins suffisante, à l'élaboration d'une définition socialement établie de la vérité ». Par ailleurs, Giddens (1994) présente une vision légèrement différente ; il s'exprime sur une modernité où se côtoient de manière ambivalente confort et anxiété, sécurité et danger, adoucissement et durcissement dans la gestion des conflits sociaux. Il distingue trois discontinuités entre institutions sociales modernes et traditionnelles : la vitesse des changements, la portée des changements et la nature intrinsèque des institutions modernes. D'autres pourraient être évoqués, comme celles reliées à l'irréversibilité des transformations... Ces éléments qu'il n'est pas possible d'approfondir ici placent la Société dans ce que l'on nomme post-modernité. Giddens (1994) écrit à ce sujet : « la volonté de mieux contrôler notre environnement par une connaissance toujours accrue de celui-ci nous amène constamment à remettre le savoir en question et à agir sur notre environnement en le modifiant. Le problème n'est donc pas tant l'absence de monde social stable à connaître, mais que la connaissance de ce monde contribue à son caractère instable ou mutable ».

Voilà donc le décor instable présenté : beaucoup (trop) de morts, des gestes barrières, des vaccins, des médicaments (dont certains sont discutables (Schultz et Blanchard, 2022)), une société inquiète, un pouvoir politique, associé à un conseil scientifique, peu sûr de ses dires en dehors de son champ de compétences, bref où est la confiance dans une situation brouillée ? Une question subsidiaire doit ici être posée : Pourquoi les sciences du génie des procédés interviennent dans ce travail ? En fait, ce que savent faire ces disciplines, c'est modéliser des systèmes dynamiques en interaction (qu'elles appliquent généralement aux transformations de la matière et de l'énergie). C'est bien ce qui se passe avec ce virus transmis pour une très large part d'individu à individu. Les modèles sont partout et ces spécialistes interviennent dans de nombreuses questions industrielles, technologiques, sociétales et médicales, même si, d'un point de vue historique, cette discipline s'est développée à partir des applications industrielles (Schaer et André, 2020). Les échanges interdisciplinaires ne sont pas toujours faciles, à cause de l'apprentissage du vocabulaire (indispensable pour avancer) utilisé dans les autres disciplines. C'est ce qui est tenté ci-après.

1. Un modèle différentiel pour simuler les effets du virus

« L'hétérogène, et non l'homogène, est au cœur des choses » (Tarde, 2001).

« Nous ne savons pas ce qui compose notre monde, quels sont les acteurs qui y agissent ni les épreuves qu'ils se font subir les uns aux autres. Nous ne savons pas non plus ce qui est important et négligeable, et ce qui cause les déplacements que nous observons autour de nous » (Latour, 1984).

« Le problème que posent les maladies infectieuses émergentes pour un anthropologue est : comment, parmi les mutations catastrophiques au niveau biologique, certaines deviennent-elles des catastrophes politiques ? » (Keck, 2010).

L'Etat ici « exerce son pouvoir sur les êtres vivants en tant qu'êtres vivants » (Foucault, 1978-1979). Et ici telle est la raison pour laquelle on parle de « population » : les humains y sont considérés comme des ensembles d'êtres vivants (Gaudillière, Izambert et Juven, 2021). Ces auteurs écrivent : « Peu importe leur origine et les interrogations qu'elle soulève, une fois qu'ils ont atteints les humains et qu'ils circulent avec eux, les virus ne semblent plus vivre que dans des circuits humains, qui sont des circuits sociaux déterritorialisés ». Les humains deviennent donc des quantités auxquelles on peut appliquer de la modélisation mathématique de maîtrise de la propagation de cette maladie infectieuse qui est un outil pour :

- Définir des tendances, les plus robustes possibles, des propagations des maladies ;
- Prévoir la trajectoire future d'une écloison ;
- Aider à orienter la planification de la santé publique et la lutte contre les maladies infectieuses.

« La crise sanitaire mondiale du Coronavirus Covid-19 a démontré le rôle des modélisations mathématiques dans la prise de décisions politiques et sanitaires. Mais comment sont faites ces modélisations ? Sur quels paramètres se basent-elles ? » (Bayette et Monticelli, 2021). Ces auteurs rappellent l'existence de divers modèles :

- De type « SIR », un modèle à plusieurs catégories (on définit l'évolution temporelle (t) de la taille de trois sous-groupes : S(t) pour les personnes saines (susceptible en anglais), I(t) les personnes infectées (infected) et R(t) les personnes retirées (removed). Il s'agit d'une approche globale où les évolutions reposent sur des équations différentielles (voir également Adiga et al, 2020 ; Schur, 2021) ;

- De type « Monte-Carlo » : par de tirs aléatoires, la méthode est discrète et aléatoire (elle permet de représenter des déplacements des individus et leurs potentiels contacts) ;

- Par ailleurs, d'autres méthodes plus complexes peuvent affiner ces modèles classiques (Djidjou-Demasse, Selinger et Sofonea, 2020, McGrail et al, 2020 ; Bastidon et Parent, 2021 ; Rémond et Rémond, 2022 ; Apolloni, 2021). Des démarches complémentaires à la modélisation reposant sur une exhaustivité d'information liée aux patients et à leur environnement pour modéliser l'impact du virus. Cette approche nécessite l'accès aux données fines des patients hospitalisés et des données de contexte qu'il faut au préalable identifier et collecter (Addactis, 2020). Pour des méthodes stochastiques, en particulier associées à la pandémie Covid-19, le lecteur pourra avantageusement extraire des informations de Bertozzi et al, 2020 ; Calleri, Nastasi et Romano, 2021 ; Guo et al, 2022 ; Hoertel et al, 2020 ; Srivastav, Stollenwerk et Aguiar, 2022 ; Niño-Torres et al, 2022 ; Calleri, Nastasi et Romano, 2021 ; etc.

Dans ce travail, des méthodes SIR vont définir des tendances en tâchant de mettre en évidence les paramètres d'influences principaux, puis, dans une deuxième partie, des méthodes plus fines (mais qui ont leur limites en termes de taille numérique) s'appuyant sur des méthodes de type « Monte-Carlo ». En effet, pour les maladies transmissibles, le paradigme central est celui de la contagion interhumaine. Depuis 1927, la modélisation mathématique des épidémies de maladies transmissibles, de type SIR, s'appuie sur les travaux de Kermack et McKendrick (voir également May et Anderson, 1987). Les possibilités d'usage des modèles sont reliées au compromis simplification-robustesse. Il ne s'agit pas de décider, par exemple, d'une action de prévention contre le virus, mais au mieux d'aider à soutenir celle-ci. Si ces modélisations un peu simplistes peuvent être très utiles, un maximum d'humilité reste requis et il faut s'en contenter quand on n'a pas de meilleure méthode disponible.

REMARQUE. Problème inverse

Dans ce travail, nous nous sommes juste intéressés à une approche « bottom-up » de tendances temporelles concernant les infections, les effets des vaccinations, etc. Il ne s'agit pas, comme le montre la figure 4 d'une recherche des réglementations à générer pour que les hôpitaux ne soient pas surchargés (Stoop, 2021 ; Rainisch, Undurraga et Chowell, 2020)...

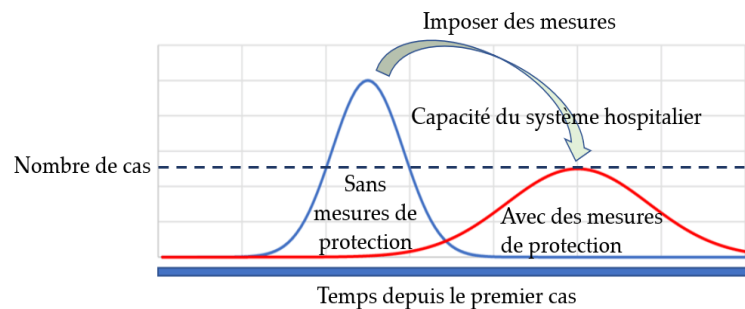


Figure 4. Principe de la recherche d'une prévention en vue d'un résultat dans une approche téléologique

1.1. Les difficultés de définir un modèle robuste

« Il est un intéressant parallélisme [...] entre deux des affirmations que l'on entend fréquemment au sujet des ordinateurs et de la simulation : 1. Une simulation n'est pas meilleure que les hypothèses sur lesquelles elle repose ; 2. Un ordinateur ne peut faire que ce qu'il est programmé pour faire ! Je ne démentirai pas ces assertions puisque les deux me semblent vraies. Mais, ni l'une, ni l'autre n'interdisent que la simulation puisse nous dire des choses que nous ne savions pas » (Simon, 1974).

« Un point clé dans la gestion de crises inédites est que l'on découvre au cours de la crise quels sont les facteurs essentiels qui interviennent et sur lesquels les autorités peuvent interagir. Il est donc illusoire d'espérer être pleinement préparé et outillé » (Benveniste et Gouzènes, 2021).

En juillet 2021, l'ANSES écrivait : « Les données scientifiques considérées dans leur ensemble confirment la possibilité de transmission du virus SARS-CoV-2 par des aérosols chargés de particules ayant conservé leur infectiosité. Toutefois, il est aujourd'hui impossible de déterminer quelle est la part respective des différentes voies de transmission du SARS-CoV-2 en population générale, à savoir :

- Le contact direct avec un individu infecté ;
- La transmission par gouttelettes et aérosols à courte distance (moins de 2 mètres) ;
- La transmission par aérosols à longue distance ;
- Le contact indirect avec des surfaces contaminées.

Les parts respectives de ces quatre voies de transmission nécessiteraient d'être quantifiées par la communauté scientifique. Dans les environnements clos, cela permettrait notamment d'adapter les mesures de gestion et les gestes barrière à adopter en fonction de différentes situations identifiées et des paramètres correspondants, comme le taux d'humidité, la température et le volume de la pièce, le nombre de personnes présentes, la présence ou non de système de ventilation, etc. ».

Ces différents éléments restent probables, sans que l'on dispose de certitudes, ce qui a amené à proposer un modèle simplifié tel que défini ci-après et s'appuyant sur le schéma suivant, rappelé sur la figure 5 (cf. par exemple, Ladet, 2020 ; Meadows, Randers et Meadows, 1993 ; 2004 ; Egilmez et Tatari, 2012). Les paramètres du modèle sont ajustés pour que les prédictions, en l'absence de données fiables, soient compatibles avec les résultats expérimentaux (nombre de personnes contact,

par exemple). Ils ne signifient pas une vérité, mais ils doivent avoir du sens et être susceptibles d'être remis en cause si de nouvelles informations fiables sont publiées.

REMARQUE. la modélisation

Le modèle repose sur un modèle de type SIR (Bayette et Monticelli, 2021) qui permet de modéliser la propagation d'un virus ou d'une maladie. Il s'appuie sur le découpage de la population en trois groupes ou compartiments : les individus sains, infectés et retirés (c'est-à-dire immunisés). Cependant, dans cette étude il est très loin d'être suffisant ; ainsi par rapport à un modèle SIR classique, des relations entre les trois compartiments et des facteurs ont été ajoutés :

Un individu sain peut être infecté en étant en contact avec un individu infecté ($\beta I S$) ou en étant en contact avec une surface contaminée (αS) ;

La distanciation sociale/les gestes barrière et le port du masque (et de sa performance) ont une influence sur la propagation du virus entre un individu sain et un individu contaminé ($\sigma (1-\kappa)$) ;

Les nouveaux nés sont nécessairement sains ($v (S+I+R)$). Cela peut paraître paradoxal de parler de nouveaux nés alors qu'il a été considéré que la population considéré est exclusivement composé d'adultes. Pour expliquer cela, on peut remplacer l'hypothèse précédente par une nouvelle qui considère que les enfants ont le même comportement et les mêmes propriétés que les adultes vis-à-vis de la propagation du virus. En réalité, il sera observé que le taux de natalité et de mortalité ont une influence visible uniquement à la fin des simulations (lorsque l'épidémie se termine) ;

Les individus qui décèdent appartiennent aux trois groupes S, I et R ($\mu S, \mu I$ et μR) ;

Il est possible pour une personne saine de devenir immunisée sans devenir infectée via la vaccination ($\varepsilon \theta S$) ;

Les individus immunisés ne le sont pas indéfiniment et perdent leur immunité au bout d'un certain temps noté t_{immu} (δ) ;

Une quatrième équation a été ajoutée afin de visualisée la quantité de virus présente. Elle diminue à cause de sa durée de vie limitée ($(-1)/\tau V$), mais augmente à mesure qu'il est produit par des hôtes infectés (ρI)

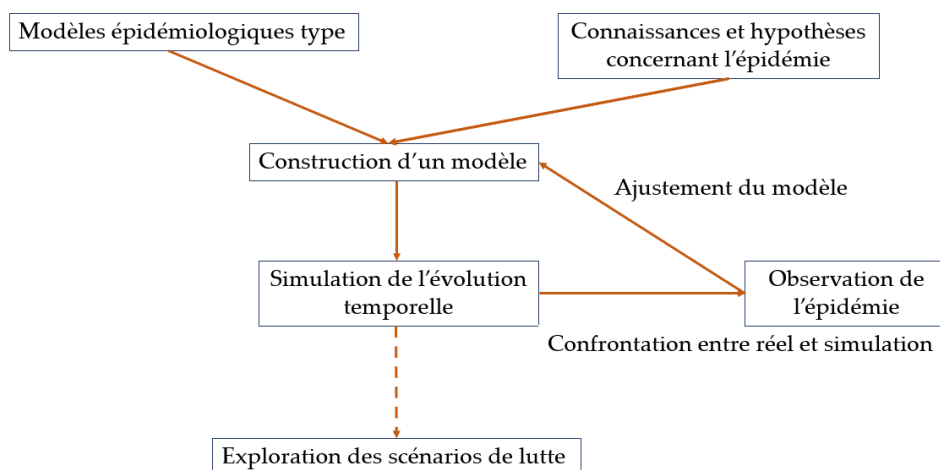


Figure 5. Schéma classique d'élaboration d'un modèle SIR

Sur cette base, qui a fait ses preuves dans des situations similaires, le modèle différentiel suivant a été mis en place :

$$\begin{aligned} \frac{dS}{dt} &= -\beta \sigma (1 - \kappa) I S - \alpha S + \nu (S + I + R) - \mu S - \varepsilon \theta S + \delta \\ \frac{dI}{dt} &= +\beta \sigma (1 - \kappa) I S + \alpha S - \gamma I - \mu I \\ \frac{dR}{dt} &= \gamma I - \mu R + \varepsilon \theta S - \delta \\ \frac{dV}{dt} &= \frac{-1}{\tau} V + \rho I \end{aligned}$$

Avec , rappelé par les différentes interactions sur la figure 6, les significations suivantes :

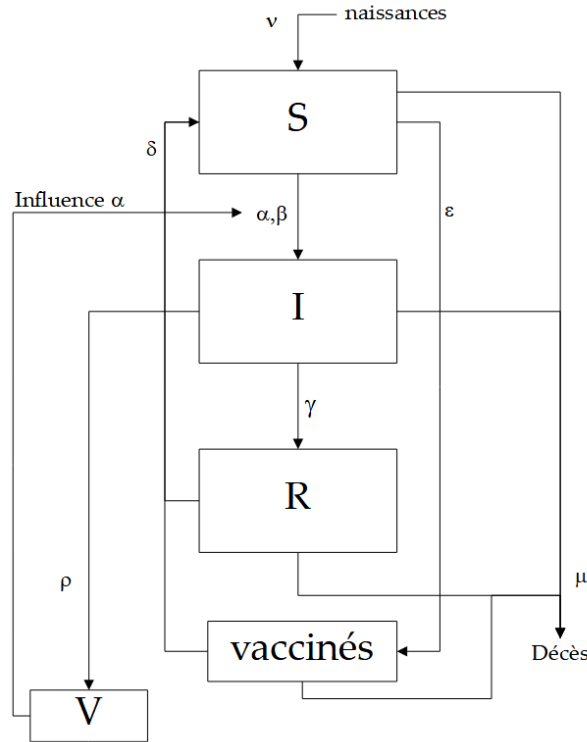


Figure 6. Interactions entre compartiments et paramètres concernés

- S La fraction d’individus sains (sans unité et compris entre 0 et 1)
- I La fraction d’individus infectés par le virus (idem)
- R La fraction d’individus retirés (ou immunisés) (idem)
- V La « quantité » de virus rapportée au nombre d’individus de la population concernée (nombre)
- β Le taux de transmission (d’humain à humain) à une distance donnée (Jour^{-1})
- α Taux contamination spontanée (de virus à humain) (Jour^{-1}) – α peut être une valeur fixe ou variable, par exemple proportionnel à V
- γ Le taux de guérison (Jour^{-1})
- ν Le taux de natalité (Jour^{-1})
- μ Le taux de mortalité (Jour^{-1})
- ε Le taux de vaccination (Jour^{-1})
- θ L’efficacité du vaccin (sans unité et compris entre 0 et 1)
- δ La prise en compte de la perte d’immunité au cours du temps (Jour^{-1})
- σ Le coefficient de prise en compte de la distance moyenne $\langle d \rangle$ entre deux individus (sans unité et compris entre 0 et 1)

- κ L'efficacité d'un masque et des gestes barrières (sans unité et compris entre 0 et 1) (cf. Eikenberry et al, 2020)
- τ La durée de vie du virus (Jour)
- ρ Le nombre de virus relargués par un individu infecté en une journée (Nombre/personne/Jour)

D'une part, dans ce modèle simplifié, on ne prend pas en compte un apport de virus extérieur à la zone d'intérêt. On fait donc l'hypothèse d'un système « fermé » sans flux extérieurs de personnes porteuses de virus. Dans ce modèle, on utilise une valeur moyenne $\langle d \rangle$, ce qui est une hypothèse simplificatrice forte puisque l'on considère que l'exposition est radiale, qui s'exprime en $1/d$, sans prendre en compte les hétérogénéités de la structure spatiale de la population. Or, la moyenne des moyennes n'a pas de raison dans cet exemple d'être la moyenne ! Des études sur la nature et sur la fréquence des contacts dans la population ont cependant permis d'élaborer des matrices de contact qui permettent de montrer que les interactions intra et inter classes d'âge sont différentes. La prise en compte de l'hétérogénéité des interactions dans la population est alors possible par une stratification du modèle en fonction de l'âge qui rend le modèle plus réaliste (Di Domenico et al, 2020), mais d'une pratique plus difficile. Cependant, nous montrerons que cette considération simple ne perturbe pas notablement les tendances... (cf.§2).

D'autre part, ce modèle fait apparaître un élément très important dans la dynamique de la pandémie, le premier terme : $\beta \sigma (1-\kappa) I S$ qui associe deux termes en interaction : S et I, ce qui normalement entraîne des situations oscillantes (cf. infra) et un terme que l'on peut globaliser qui est $\Omega = \beta \sigma (1-\kappa)$. Deux éléments de ce produit de paramètres sont à distinguer : l'effet de la distance via σ qui suit une loi en $1/d$ et le taux de protection des individus via κ (par exemple avec un confinement absolu et radical comme en Chine, $(1-\kappa)$ est nul et localement, la pandémie s'éteint. Cependant, comme beaucoup de paramètres d'influence se retrouvent dans $\beta \sigma (1-\kappa)$, des situations identiques peuvent se retrouver avec des valeurs des paramètres différentes. Si l'on disposait de données fiables sur le taux d'infection dépendant de l'âge des personnes, inclus dans Ω , le modèle pourrait illustrer de possibles variations.

REMARQUE. Systèmes numériques mal-conditionnés

Lorsqu'un système linéaire est « mal conditionné », cela signifie que de petits changements dans les données conduisent à un grand changement de solution. Ces systèmes sont ceux qui peuvent avoir une solution exacte dans une situation idéale mais en pratique sont difficilement solubles en raison des limites de la précision de calcul. Cet effet peut être amplifié dans le modèle avec l'exemple du produit I S. Au départ, l'un de ces paramètres est égal à 1 pendant que l'autre est nul. C'est la raison pour laquelle on choisit à $t = 0$, I égal à 0.01. Il peut également intervenir quand on associe des termes très grands à des termes très petits...

Pour caractériser les distributions des temps d'incubation et d'infection, plusieurs auteurs ont proposé une loi exponentielle (Britton et O'Neill, 2002) ou une loi gamma (Groendyke, Welch et Hunter, 2011). Cette dernière dispose d'une meilleure flexibilité que la loi exponentielle qui n'a qu'un seul paramètre. Dans le cas où ces données ne sont pas disponibles, les estimations des paramètres de la littérature (quand elles existent) peuvent être utilisées pour calibrer une loi adaptée. Enfin, parmi les autres paramètres d'influence à prendre en considération se trouve la durée de vie moyenne du virus (τ). Mais, le taux de relargage de virus par des personnes vaccinées est une question préoccupante : d'ailleurs, cette situation spécifique sera prise en considération au §1-4. Selon Up Magazine (2022 a), au Royaume-Uni, les rapports de réinfection par le virus sont de plus en plus nombreux, y compris des personnes testées positives à quelques semaines d'intervalle... Question ouverte...

REMARQUE. Fiabilité des résultats

Des études scientifiques confortent des décisions tandis que d'autres ne sont pas pris en considération parce que contradictoires. Cela s'appelle du « cherry-picking », un procédé rhétorique peu scientifique ! Les modèles ne peuvent pas prédire finement l'état de l'épidémie dans son ensemble, ils ont pour but de répondre à une question comme celle de savoir l'évolution d'une dynamique. En effet, l'incertitude inhérente aux modélisations doit être prise en compte (Saltelli et al, 2020 ; Castro et al, 2020 ; AIP, 2020 ; Faranda et al, 2020 ; Holmdahl et, Buckee, 2020 ; Apolloni, 2021). Par exemple, la modélisation de l'épidémie, devrait prendre en considération des comportements humains, difficilement anticipables par essence. En période épidémique, les lignées virales évoluent différemment dans les populations vaccinées et non vaccinées et ces aspects devraient être pris en compte, etc. Les méthodes de comptage selon les pays devraient être également identiques, etc. (Garcia et al, 2021).

Dans cette société ouverte, où tout le monde peut, via internet, communiquer sur tout, on peut souffrir de nombreux maux : une désinformation massive associée à des « Fakes-News », des informations de deuxième main approximatives, des publications scientifiques réalisées (trop) rapidement, des mélanges science-politique et enfin de vrais travaux qui peuvent assurer en partie la robustesse d'un dossier (Musillo et al, 2020). Dans le domaine lié à la pandémie du Covid-19 dont le traitement est largement multifactoriel, il est nécessaire de disposer d'une connaissance « nettoyée » des scories attachées au problème, avec la meilleure actualisation possible, surtout si l'on veut agir efficacement sur certains paramètres pour la réduire le plus possible. Mais est-ce possible ?

1.2. Une situation de référence

« Abraham Maslow (1966) énonçait : « Tout ressemble à un clou pour qui ne possède qu'un marteau ». A ce jeu-là, ils ne voient que des clous, des clous à frapper de rentabilité. Imaginez donc le bénéfice structurel de cette épidémie : de nombreuses places en EHPAD, une énorme baisse des cotisations sociales (moins de retraites et moins de maladies), une baisse du coût du travail, une plus grande compétitivité ; bref, un pays jeune et en bonne santé dans la compétition mondiale » (Mallet, 2020).

« Nous avons eu raison de ne pas confiner la France à la fin du mois de janvier parce qu'il n'y a pas eu l'explosion qui était prévue par tous les modèles » (Macron, 2021).

« L'épidémiologiste se montre très critique envers l'exécutif ou les experts médiatiques qui minimisent la vague Omicron et promettent une chimérique immunité collective » (Costagliola, 2022).

Une situation simplifiée a été choisie en ne prenant en compte qu'un seul virus « type ». L'institut Pasteur (Andronico et al, 2021) dans un contexte de modélisation un peu différent a de son côté pris en considération les effets liés à différents variants, dont Omicron). Le choix opéré ici est lié à la difficulté d'évaluer avec précision la sévérité intrinsèque des différents variants, à cause du grand nombre de paramètres dont la valeur est incertaine. Cela signifie que l'on considère que, quel que soit le variant, cela ne change pas les tendances.

Par ailleurs, durant la première vague, la mise en place du confinement national a eu des effets mesurables sur la propagation du virus sur le territoire. Avec les gestes barrières, les masques de protection respiratoire et l'ensemble des autres mesures prises lors du confinement, leur impact a été et est important sur la propagation du virus et de l'infectiosité. Cependant, comme le rappelle la figure 3, malgré (ou, à cause) des différents variants du virus, on observe des vagues successives d'exposition des citoyens. Les paramètres du modèle de référence ont été choisis de manière à se

rapprocher de cette réalité. Par ailleurs, le modèle proposé ici peut prendre en compte les différentes voies de prévention via $(1-\kappa)$, en même temps que la distance moyenne $\langle d \rangle$.

Dans ce qui suit, les conditions initiales utilisées ont été choisies arbitrairement et sont :

- $S(t=0) = 0.99$
- $I(t=0) = 0.01$
- $R(t=0) = 0$
- $V(t=0) = 0.01$

Sauf indication contraire, les termes, coefficients et paramètres listés ci-dessous auront les valeurs numériques suivantes qui permettent de trouver une situation « numérique » se rapprochant des résultats de la figure 3 (en s'affranchissant des effets divers : confinements, gestes barrières, vaccinations, température, etc. (cf. tableau 1).

Terme/coefficient/paramètre	Valeur numérique	Unité
β	0.2	Jour ⁻¹
α	1,16 e ⁻⁶ si α constant 6,7638 e ⁻⁷ V Sinon	Jour ⁻¹
γ	3,5 e ⁻²	Jour ⁻¹
ν	2,7397 e ⁻⁵	Jour ⁻¹
μ	2,7397 e ⁻⁵	Jour ⁻¹
ε	2,0 e ⁻³	Jour ⁻¹
θ	0.8	-
κ	0.7	-
τ	15	Jour
ρ	1000	Virus/individu/jour
R_{\min} (distance minimale physiquement entre 2 individus)	0,4	mètre
$\langle d \rangle$ la distance moyenne entre les individus	1	mètre
σ	1 si la distanciation sociale n'est pas appliquée $0 < \sigma < 1$ Sinon	-
t_{immu} (durée au bout de laquelle un individu perd son immunité)	182	jour

Tableau 1. Conditions de la modélisation de référence

Tous les paramètres présentés dans ce tableau n'ont cependant pas toutes été choisies de manière aléatoire : ainsi, les valeurs de α (cas constant), β et γ ont été reprises de Frenkel et Schwartz (2021) et utilisent des données accessibles au public (John Hopkins, 2019 ; Dong, Du et Gardner, 2020). La relation permettant d'évaluer α dans le cas où il n'est pas constant et dépend de V a été obtenue en réalisant une régression linéaire de sorte que α évalué à V moyen lors d'une simulation de 1000 jours sans vaccination où gestes barrières fournit la valeur de α dans le cas où il est constant. Le taux

de natalité ν et de mortalité μ ont été récupéré à partir des données fournies par l'INSEE (2021 ; 2021 a). Le taux de vaccination ε correspondant à la fraction de la population se faisant vacciner chaque jour a été estimé en effectuant une régression linéaire en utilisant les chiffres indiqués par « Santé publique France » (2022). Le coefficient de distanciation sociale σ a été défini comme étant le rapport $R_{\min}/\langle d \rangle$. Ainsi, ce coefficient vaut 1 lorsque la distance moyenne entre les individus est minimale et est inversement proportionnel à $\langle d \rangle$. L'efficacité des masques, du vaccin, la durée de vie du virus, τ et ρ sont quatre valeurs ajustables.

Tout d'abord, pour inaugurer ce travail de modélisation, nous avons fait l'hypothèse que le pouvoir médical suivi par le pouvoir politique avait anticipé l'apparition de la pandémie et, en conséquence, avait pu choisir à l'avance des voies de prévention qui sont effectives au moment où le virus arrive sur notre territoire. Plus loin, dans la description des résultats des modélisations seront pris en considération des retards à ces anticipations avec des modes de régulation (si ce n'est de conseils appuyés) qui interviennent au coup par coup : gestes barrières (lavage des mains, distance entre personnes, masques), vaccins, etc.

Les conditions dites de référence correspondent aux situations suivantes : Evolution temporelle sans gestes barrières et sans vaccin avec un virus à durée de vie limitée et un alpha dépendant de V . La figure 7 (avec un rappel de la figure 3) rassemble les résultats.

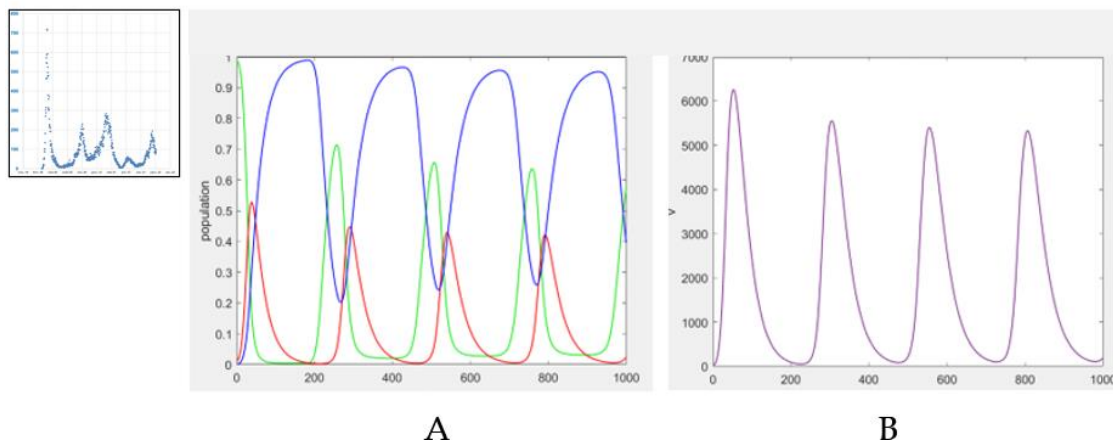


Figure 7. Situation de référence ($\Omega_0 = 0.2$) : A : I en rouge ; S en vert ; R : en bleu ; N en noir (vérification que $S + I + R = 1$) – B : Concentration en Virus « libre » ; en abscisse le temps est exprimé en jours (à gauche, rappel de la figure 3)

Pour réaliser cette figure, la durée de vie du virus a été 15 jours (mais pourrait être choisie plus faible ou plus grande en changeant V , à moins que l'on dispose d'une valeur précise mesurée expérimentalement), τ à 182 jours (6 mois) et $\rho = 1000$.

Vagues successives : s'il n'y a plus d'individus infectés, ils ne peuvent plus répandre le virus dans l'air. C'est une visualisation partielle du problème du lapin et du loup : considérons une population de lapins dans une île, en l'absence de prédateurs, la population augmente. Si l'on introduit des loups, ceux-ci vont voir leur population augmenter tant qu'il y aura des lapins à manger. Alors, la population des lapins décroît, puis dans un deuxième temps celle des loups qui n'ont plus de nourriture. Cette population devient alors si petite que la population des lapins réaugmente, etc. Ces situations classiques se retrouvent dans cette figure.

1.3. Conditions d'amortissement(s) du phénomène

« Nous n'avons pas appris les vertus pédagogiques de l'échec, les vertus expérimentales de l'erreur » (Laville, 2002).

« Anticiper, ce n'est pas seulement prévoir ; c'est beaucoup plus que prédire ce que sera le prochain événement. C'est plus que faire face au prochain événement, c'est le créer » (Follett, 1949).

Les différentes stratégies sont évaluées notamment en fonction de paramètres liés au virus, de la propagation de l'épidémie dans le pays en fonction de sa densité, de l'âge des individus, des capacités sanitaires (lits de réanimations, masques en nombre et en qualités, présence et usage de solutions hydroalcooliques (SHA)) et des cultures nationales (hygiène, prévention sanitaire, idéologie, autorité de l'état, etc.). Différentes stratégies ont déjà été proposées par Ferguson et al (2020) avec la recherche des meilleures conditions permettant d'atteindre (si elle existe) l'immunité de masse. Il s'agit alors, pour cet auteur, de laisser le virus contaminer une certaine majorité de la population afin de produire une immunité collective. Dans ce travail, seules des tendances sont recherchées.

En automatique, le terme PID signifie « dérivé intégral proportionnel ». Il permet d'effectuer par rétroaction des ajustements. Mal réglé, des oscillations en sortie du système apparaissent, bien réglé, il peut y avoir une faible oscillation avant d'atteindre la valeur désirée, trop fortement contraint, cette dernière sera atteinte au bout d'un temps long, voire infini... Il s'agit bien dans le problème posé de « jouer » sur les paramètres à notre disposition, en particulier Ω (distance, gestes barrière, masque), population vaccinée pour examiner comment on peut faire évoluer les tendances présentées sur la figure 7.

REMARQUE. Note de l'ANSES (2021 a) et ses conséquences sur le choix des masques

Cet Institut de référence a publié en 2021 un document relatif à la viabilité dans l'air et la dose infectante du virus. Ce document fait état d'indications sur la transmission par inhalation de particules virales dans les aérosols et de leur viabilité. L'ANSES rappelle que « la quantification de la contribution des différentes voies de transmission du SARS-COV-2 [Covid-19] reste à ce jour rarement documentée ». L'infection du tractus respiratoire nasopharyngé est proposée comme une voie d'entrée principale du virus (Basu, 2021).

Alors, l'INRS (2022) rappelle des éléments essentiels concernant les masques de protection respiratoire : « Un masque chirurgical est un dispositif médical (norme EN 14683). Il est destiné à éviter la projection vers l'entourage des gouttelettes émises par celui qui porte le masque. Il protège également celui qui le porte contre les projections de gouttelettes émises par une personne en vis-à-vis. En revanche, il ne protège pas contre l'inhalation de très petites particules en suspension dans l'air ». Par ailleurs, « il existe trois catégories de masques FFP, selon leur efficacité (estimée en fonction de l'efficacité du filtre et de la fuite au visage). Ainsi, on distingue :

Les masques FFP1 filtrant au moins 80 % des aérosols de taille moyenne 0,6 μm (fuite totale vers l'intérieur < 22 %).

Les masques FFP2 filtrant au moins 94 % des aérosols de taille moyenne 0,6 μm (fuite totale vers l'intérieur < 8 %).

Les masques FFP3 filtrant au moins 99 % des aérosols de taille moyenne 0,6 μm (fuite totale vers l'intérieur < 2 %) – (Voir également Chazelet et Pacault, 2021).

Rappelons toutefois que l'efficacité d'un filtre dépend de la taille des particules qui le traverse. La figure 8, issue de Poireault (2020), met en lumière plusieurs mécanismes intervenant dans la filtration avec des tailles qui traversent plus aisément les fibres du masque que d'autres. Dans les modélisations entreprises, ces questions de physique de transfert ne sont pas prises en considération. Elles sont au mieux incluses dans une efficacité moyenne des masques.

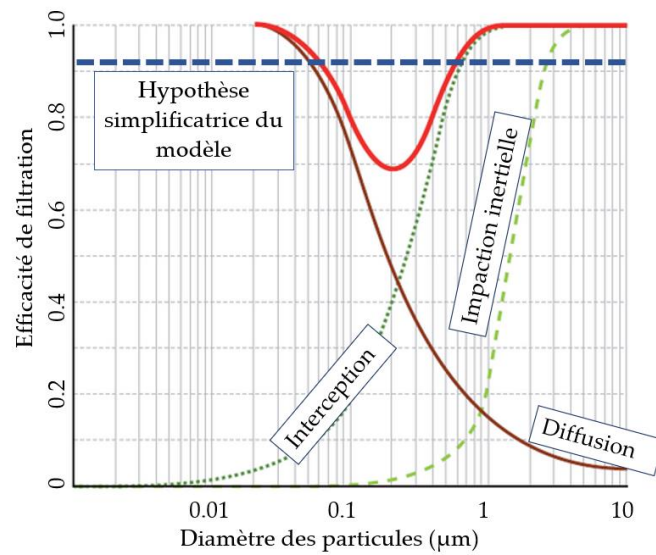


Figure 8. Efficacité de piégeage de particules en fonction de la taille de ces dernières

Evolution temporelle pour $\Omega = 0.1$

La figure 9 rassemble les résultats en rappelant à gauche les éléments de la situation de référence. On observe que pour une valeur de Ω deux fois plus petite que Ω_0 , les courbes se différencient : Premièrement, la période des oscillations est plus grande, chaque vague de contamination dure plus longtemps. Deuxièmement, l’amplitude des oscillations est plus petite. Moins d’individus sont infectés en même temps lors de chaque vague. La comparaison entre cette situation et le cas de référence illustre bien la tentative de « lisser la courbe ». Le but de cette stratégie face à la pandémie n’est pas nécessairement de diminuer le nombre de personnes qui seront ou ont été infecté, mais de faire en sorte qu’un minimum d’individus soit infecté en même temps.

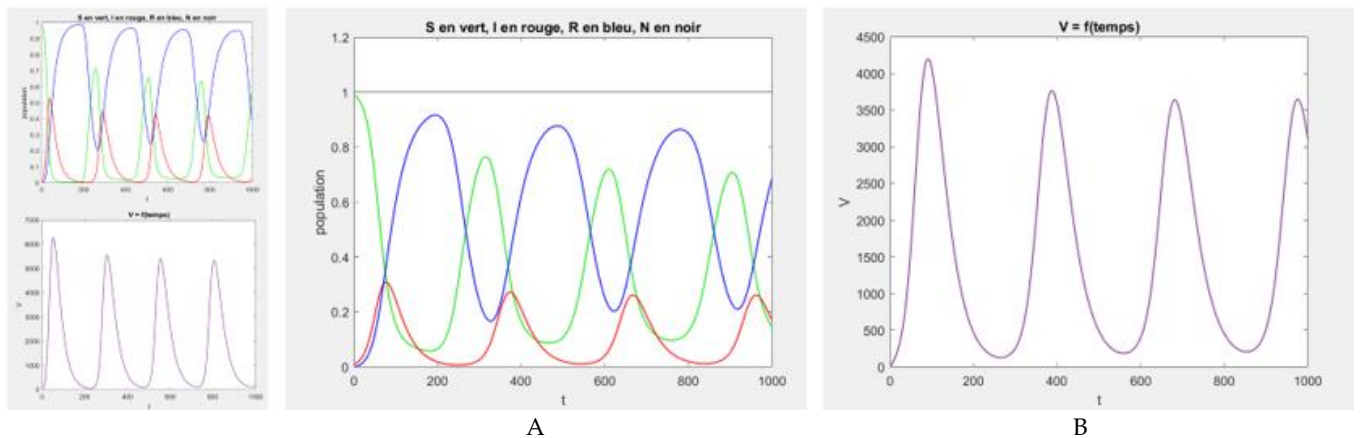


Figure 9. Situation où $\Omega = 0.1$: A : I en rouge ; S en vert ; R : en bleu ; N en noir (vérification que $S + I + R = 1$) – B : Concentration en Virus « libre » ; en abscisse le temps est exprimé en jours (à gauche, rappel de la figure 7)

Evolution temporelle pour $\Omega = 0.06$ (cf. figure 10)

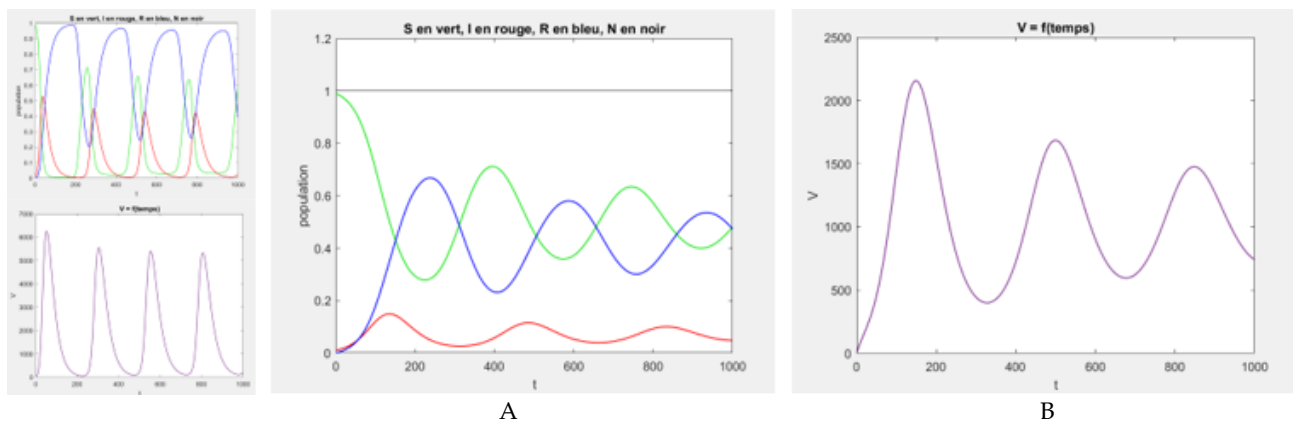


Figure 10. Situation où $\Omega = 0.06$: A : I en rouge ; S en vert ; R : en bleu ; N en noir (vérification que $S + I + R = 1$) – B : Concentration en Virus « libre » ; en abscisse le temps est exprimé en jours (à gauche, rappel de la figure 7)

Evolution temporelle pour $\Omega = 0.02$ (cf. figure 11)

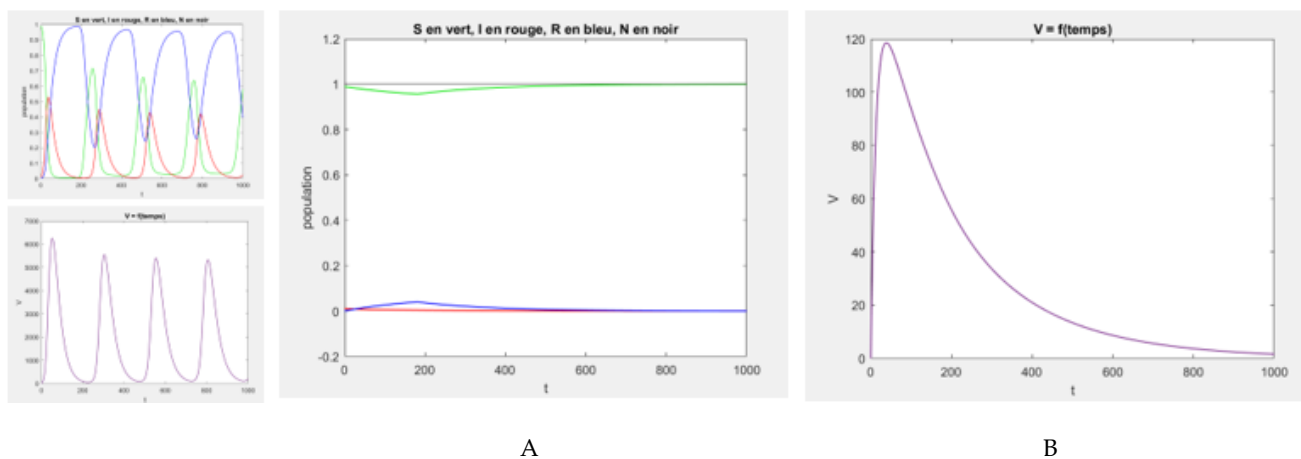


Figure 11. Situation où $\Omega = 0.02$: A : I en rouge ; S en vert ; R : en bleu ; N en noir (vérification que $S + I + R = 1$) – B : Concentration en Virus « libre » ; en abscisse le temps est exprimé en jours (à gauche, rappel de la figure 7)

Dans ces conditions strictes, la proportion d'individus infectés et la quantité de virus pour le nombre total d'individus tendent vers 0. Dans ce scénario, les mesures prises pour diminuer Ω (gestes barrières, distanciation sociale et autres mesures) sont suffisantes pour mettre fin à l'épidémie (sans avoir besoin de la vaccination). C'est sur des bases de ce type que la Chine a mis en pratique sa méthode d'éradication du virus.

1.4. La question de la vaccination

« On vit au jour le jour, on vit très vite, on vit de manière irresponsable : c'est précisément cela qu'on appelle liberté » (Nietzsche, 1974).

« Le risque acceptable est la valeur d'un risque résultant d'une décision explicite établie de façon objective par comparaison avec des risques connus et admis, naturels ou technologiques dans certaines branches d'activités » (Desroches, Leroy et Vallée, 2003).

Ce qu'ont montré les différentes études médicales, c'est que la vaccination réduisait les risques pour soi, en particulier sur les aspects mortalité. Cependant, des doutes existent sur la transmission du virus par des personnes vaccinées et, de plus, même si l'obligation de vaccination est imposée dans certains pays (ce n'est pas le cas en France, malgré des incitations fortes), il reste toujours une

population, celle des enfants, qui ne l'est pas en association avec quelques % d'irréductibles hostiles à cette protection provisoire (obligation de plusieurs doses, allant maintenant à 4 en Israël). On considère tout d'abord que la vaccination est engagée dès $t = 0$. En première approximation, son efficacité, considérée comme immédiate, θ est comprise entre 0 et 1 et stable dans le temps. Une hypothèse qui sera discutée plus avant est que toute personne vaccinée ne propage plus de virus. La figure 12 illustre les résultats, sachant que l'on ne vaccine que les personnes saines avec une vitesse $\varepsilon \theta S$ (jours⁻¹).

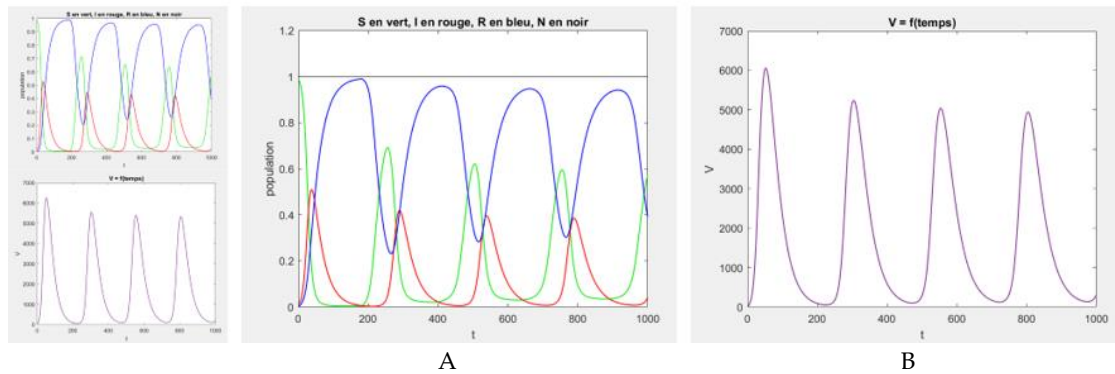


Figure 12. Situation où la vaccination intervient de manière progressive (cf. texte) : A : I en rouge ; S en vert ; R : en bleu ; N en noir (vérification que $S + I + R = 1$)

Des modifications sont perceptibles sans qu'existe une relaxation nette telle qu'observée sur la figure 11.

Et si les immunisés pouvaient propager le virus ?

« Le partage constant du normal et de l'anormal, auquel tout individu est soumis, reconduit jusqu'à nous et en les appliquant à de tout autres objets, le marquage binaire et l'exil du lépreux ; l'existence de tout un ensemble de techniques et d'institutions qui se donnent pour tâche de mesurer, de contrôler, et de corriger les anormaux, fait fonctionner les dispositifs disciplinaires qu'appelait la peur de la peste. Tous les mécanismes de pouvoir qui, de nos jours encore, se disposent autour de l'anormal, pour le marquer comme pour le modifier, composent ces deux formes dont elles dérivent de loin » (Foucault, 2021).

REMARQUE. Immunité ou vaccination

L'immunité peut dans cette simulation être obtenue après infection ou par vaccination. La vaccination ne garantit donc pas une réduction de l'exposition au virus, mais participe à l'augmentation de I. Par exemple, si toute la population est vaccinée à $t = 0$ (enfants compris) et que ces personnes ne relarguent pas de virus, la valeur de V doit être nulle. En revanche, après vaccination à trois doses (parce que le vaccin n'est pas efficace à 100% et que les personnes ne sont pas toutes protégées et/ou que des personnes vaccinées sont susceptibles de relarguer du virus en faible quantité), il est possible qu'une faible partie de virus tire son origine des « vaccinés » (Personnes disposant officiellement du « Pass sanitaire ») et expose d'autres personnes, dont les non vaccinés.

En prenant un exemple très réducteur, on considère que 90% de la population est vaccinée et relargue 20% de ce que pourrait relarguer une personne atteinte, alors le taux de présence du virus est supérieur à $0.9 \cdot 0.2 = 1.8$, ce qui est très supérieur à ce qui existait en début de vague, puisqu'alors la plus grande quantité de la population était saine... Alors les vaccinés « officiels » exposent les non-vaccinés (et évidemment non le contraire).

Pour rappel, en l'absence d'usage de gestes barrières ($\sigma = 1, \kappa = 0$) il faut résoudre l'équation utilisée dans le modèle de base :

$$\frac{dS}{dt} = -\beta \sigma (1 - \kappa) I S - \alpha S + \nu (S + I + R) - \mu S - \varepsilon \theta S + \delta$$

La vitesse de propagation du virus entre individus dépend de I (la fraction en individus infectés) et de S (la fraction en individu sains). Cette équation peut être modifiée en introduisant (I + R) dans cette relation. Ainsi,

$$\frac{dS}{dt} = -\beta \sigma (1 - \kappa)(I + R) S - \alpha S + \nu (S + I + R) - \mu S - \varepsilon \theta S + \delta$$

Alors, on considère que TOUS les individus immunisés peuvent propager le virus. La vitesse de propagation du virus entre individus dépend maintenant de I, de S et de R. φ est alors le taux relatif de relargage relativement à une personne infectée non vaccinée. La vitesse de propagation du virus entre individus dépend maintenant de I, de S et de R et de φ . La figure 13, choisie pour une présentation « pédagogique » représente la situation quand il n'y a pas de différences entre I et R en termes de relargage, que 80% des individus sont immunisés à $t = 0$, que l'immunité vaccinale est permanente avec $\Omega = 0.001$ (avec des valeurs de φ allant de 10^{-3} à 5.10^{-3}).

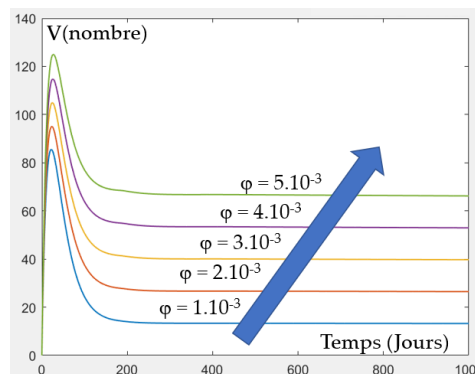


Figure 13. Evolution de la quantité de virus libre en fonction de φ

Même, si le taux de propagation du virus par des personnes immunisées est plus faible que pour des personnes portant le virus, les effets calculés montrent que l'effet global est un effet amplificateur. Si les personnes vaccinées peuvent être bien protégées à titre personnel (en termes de conséquences sur la gravité de la maladie), si elles émettent du virus, elles sont donc susceptibles d'amplifier l'intensité de la pandémie. Si cette situation existe effectivement, elle renforce - à l'envers du discours ambiant - le besoin de développer le taux de vaccination des opposants au vaccin ou, dit de manière plus radicale, la nécessaire obligation de vaccination pour toute la population !

1.5. Un retour vers une situation (peut-être) plus proche de la réalité : préventions décalées

« On pourrait dire qu'ici le modèle sort de son spectre de pertinence s'il s'agit pour lui d'aider à penser une politique pour juguler l'épidémie qui nous intéresse » (Rouchier et Barbet, 2020).

« Qu'est-ce qu'on met à la place des modélisations ? De l'intuition, des paris ? Le risque est de revenir à une gestion des maladies infectieuses qu'on avait au XVIII^{ème} siècle » (Sofonea, 2021).

Jusqu'ici, nous avons fait l'hypothèse que l'arrivée du virus était associée à des solutions de prévention pour en limiter l'effet. Ce que les Français ont connu, c'est l'arrivée du virus, des balbutiements de la part de l'Etat suivis d'un confinement, de la proposition de gestes barrières, de

l'utilisation de masques et enfin de la vaccination. Il y a donc un phasage historique à considérer. Avec juste l'usage de gestes barrières (distance + masques) appliqués à partir de $t = 60$ jours, la figure 14 montre qu'il est possible d'arrêter la pandémie (cf. figure 11 où l'on joue également sur Ω). Avec le confinement imposé, on explique son effet sur la limitation de la propagation comme l'a montré la figure 3.

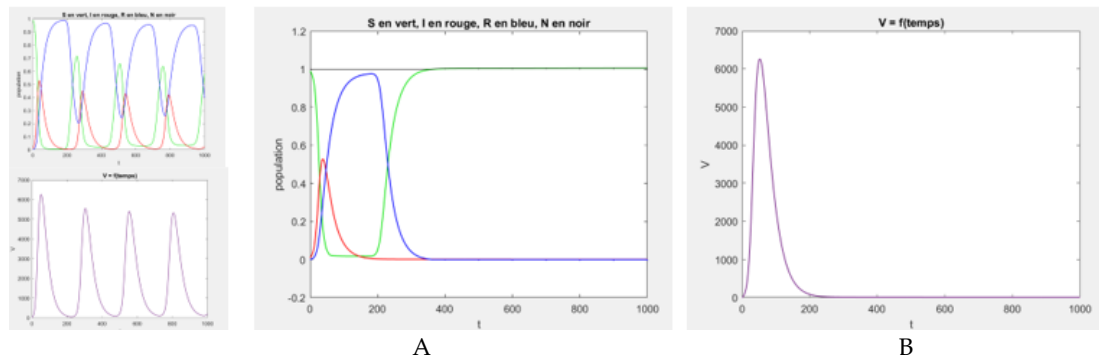


Figure 14. Situation où $\Omega = 0.2$ (avant les 60 jours) et $\Omega = 0.024$ (après) : A : I en rouge ; S en vert ; N en noir – B : Concentration en Virus « libre » ; en abscisse le temps est exprimé en jours (à gauche, rappel de la figure 7) - Cette deuxième valeur de Ω correspond à $\langle d \rangle = 1$ m, $\kappa = 0.7$

1.6. Situation « personnalisée »

« Les Français ont toutes les raisons d'être optimistes. En effet, le taux de reproduction du virus, le R_0 , est repassé en dessous de 1. Ce chiffre signifie qu'une personne infectée en contamine désormais 0,8 en moyenne. La France n'avait pas connu un R_0 si bas depuis mi-octobre 2021 » (Pageot, 2022).

« Les confinements en Europe et aux États-Unis n'ont réduit la mortalité due au Covid-19 que de 0,2 % en moyenne. Les confinements à domicile [SIP = Shelter-in-place] étaient non moins inefficaces, ne réduisant la mortalité par Covid-19 que de 2,9 % en moyenne » (Tucille, 2022).

« Une forme d'immunité collective s'est installée » (Fontanet, 2022).

Dans la vie de tous les jours, chaque personne ne reste pas en permanence à la même distance d de ses voisins. En fait, elle se déplace dans différents lieux, est amenée à rester chez elle, à se nourrir (sans masque), chez soi, dans une cantine ou un restaurant, à travailler, etc. Si l'on considère qu'être chez soi est identique à une situation où la distance interpersonnelle est grande (elle pourrait être très petite si une personne du foyer est porteuse du virus, ce qui d'un point de vue statistique n'est pas pris en considération), il est nécessaire de revenir à l'hypothèse réaliste faite dans la réalisation et l'exécution du modèle : l'exposition est en $1/d$. Par ailleurs, ce qui a été montré, c'est ce qui peut intéresser les responsables concernés par des valeurs moyennes, ce qui permet d'engager des mesures de prévention pour protéger les populations (et peut-être de moins engorger les hôpitaux). A titre personnel, ce qui peut intéresser une personne active et saine (S) qui se déplace pour son travail par exemple, c'est de savoir si elle augmente singulièrement ses risques par exemple en prenant les transports en commun, en mangeant au restaurant, en buvant debout son café, etc. Cela signifie, qu'elle subit des expositions au virus à des temps donnés (selon la situation moyenne de présence du virus) et ceci pour des distances données. Alors, si la part du temps consacrée à une activité et ζ_i , associée à une distance $\langle d_i \rangle$, alors la distance effective peut être calculée à partir de :

$$1/\langle d_{\text{eff}} \rangle = \sum \zeta_i / \langle d_i \rangle$$

Ainsi, si l'on passe 2 heures dans le métropolitain à $\langle d \rangle = 0.3$ m, 10 heures de travail et de shopping ou d'approvisionnements à $\langle d \rangle = 2$ m, 2 heures de repas à $\langle d \rangle = 1$ m et le reste à chez soi, alors

$$1/\langle d_{\text{eff}} \rangle = 2/24/0.3 + 10/24/2 + 2/24/1 = 0.49 \text{ soit } \langle d_{\text{eff}} \rangle = 2.01 \text{ m}$$

En télétravail de 8 heures, cette valeur devient : $\langle d_{\text{eff}} \rangle = 8.3$ m. Ce résultat montre à l'évidence l'intérêt de travailler chez soi pour diminuer l'exposition au virus (diminution de Ω d'un facteur 4 !).

2. Méthode stochastique (Monte-Carlo)

« Il se trouve encore d'innocents observateurs du Soi qui croient qu'il existe des « certitudes immédiates » par exemple « Je pense » ou [...] « Je veux » » (Nietzsche, 1991).

« La première vérité – je suis, je pense – reste aussi abstraite et vide qu'elle est invincible ; il lui faut être « médiatisée » par les représentations, les œuvres, les institutions, les monuments qui l'objectivent ; c'est dans ces objets, au sens le plus large du mot, que l'Ego doit se perdre et se retrouver. Nous pouvons dire, en un sens un peu paradoxal, qu'une philosophie de la réflexion n'est pas une philosophie de la conscience, si par conscience nous entendons la conscience immédiate à soi-même. La conscience, dirons-nous, est une tâche, mais elle est une tâche parce qu'elle n'est pas une donnée » (Ricœur, 1965).

Un modèle de type « automate cellulaire » connexionniste est caractérisé par trois constituants de base : un réseau, une règle d'activation et une règle d'apprentissage (Collectif SMI, 1995 ; Wang et Sun, 2013). Le réseau est composé par un ensemble de cellules placées initialement en un point donné de l'espace (cf. à deux dimensions, l'exemple de la figure 15 dont le principe est issu de Neagu et al, 2006). « La règle d'activation d'un modèle connexionniste est une procédure locale que chaque cellule suit en mettant à jour son niveau d'activation en fonction du contexte d'activation des cellules voisines ». Un modèle génétique repose sur l'évolution d'une population dans un environnement selon des critères de déplacement aléatoire, d'exposition au virus, etc. Le principe général de l'algorithme génétique développé repose sur un processus continu qui fait évoluer à partir d'une situation initiale la population de personnes saines en présence de personnes émettant des virus.

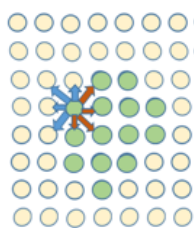
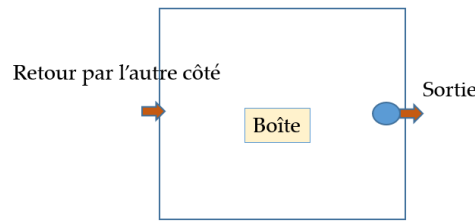


Figure 15. Principe du modèle : chaque personne interagit avec son environnement pour rester saine ou être atteinte par le virus

Plusieurs remarques permettent d'aller plus loin dans ce résultat de calcul :

- Compte tenu du grand nombre de cellules à prendre en considération, le choix du langage informatique est crucial pour atteindre des tendances dans un espace temporel « acceptable » ;
- On considère ici que les personnes sont placées dans un milieu pseudo-infini, c'est-à-dire que les individus qui sortent par exemple à gauche de la boîte réapparaissent à droite et inversement (cf. figure 16) ;



Figures 16. Une cellule qui sort à gauche de la boîte réapparaît à droite

– Cette opération nécessite un taux de remplissage relativement modeste (< 0.36 dans l'exemple de la figure 16) pour que les personnes puissent se déplacer ;

– Dans cette partie d'initialisation de la modélisation, il n'est cependant pas possible de considérer que chaque personne A n'interagit qu'avec ses voisins les plus proches avec une probabilité d'être exposé au virus. En effet, si la loi d'interaction est en $1/d$, le nombre de personnes saines varie comme d .

REMARQUE. Le jeu de la vie

Proposé par John Horton Conway en 1970, on considère des cellules réparties sur une grille, mais celles-ci ont un état binaire : elles sont soit mortes, soit vivantes. La règle de transition locale se décline en deux sous règles, qui dépendent du nombre de voisins vivants parmi les huit cellules adjacentes. En dépit de la simplicité des règles, les simulations informatiques permettaient d'observer des phénomènes surprenants dont les traits marquants peuvent se résumer à trois notions intuitives : l'auto-organisation, l'émergence et une évolution imprévisible du système. La figure 17 représente des situations à différents temps (cf. Fatès, 2007).

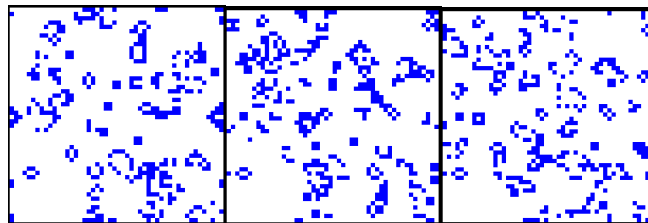
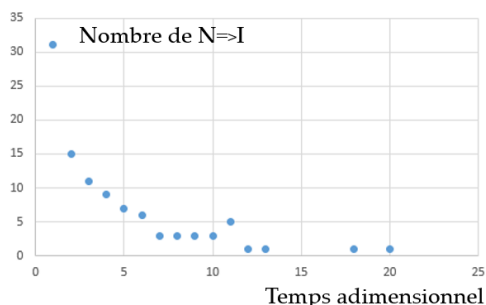


Figure 17. Evolution temporelle de la distribution (temps évoluant positivement de gauche à droite)

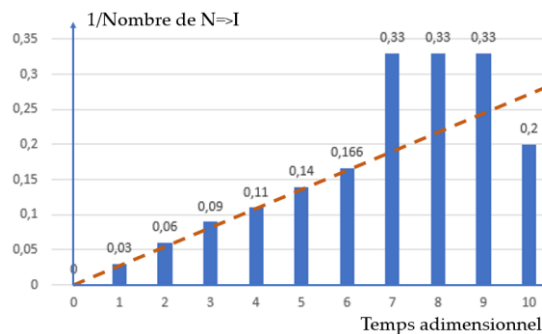
Sur la base des remarques faites, il est possible, pour des personnes réparties dans un espace infini de manière aléatoire qui se déplacent également de manière aléatoire, de calculer le temps mis pour atteindre la première infection ($N = > I$). On constitue ainsi un histogramme d'événements, tel que celui présenté sur la figure 18. Celui est réalisé de la manière suivante :

- Pour chaque personne saine, on effectue un tir d'un nombre aléatoire compris entre 0 et 1 pour chaque personne contaminée ;
- S'il est supérieur à $0.1/d$ la personne concernée reste saine ;
- Une nouvelle itération est réalisée.

Sur cette même figure, l'inverse de ce nombre est compatible avec une relation linéaire avec le temps (sans dimension), ce qui donne du poids à l'hypothèse faite en début de ce travail où l'on faisait l'hypothèse que $\langle d \rangle$ pouvait être utilisé dans les équations cinétiques.



(A)



(B)

Figure 18. Histogramme (A) et son inverse (B) en fonction du temps (adimensionnel)

Par ailleurs, dans le §1, l'espace a toujours été considéré comme infini. Avec les méthodes de type Monte-Carlo, il est possible de définir, avec des règles d'interaction comme celles utilisées ci-dessus, de « jouer » avec l'espace accessible : borné carré ou rectangulaire (comme un hall d'exposition) ou très allongé (comme un wagon d'une rame de métro), etc. Les figures 19 et 20 présentent quelques résultats des simulations.

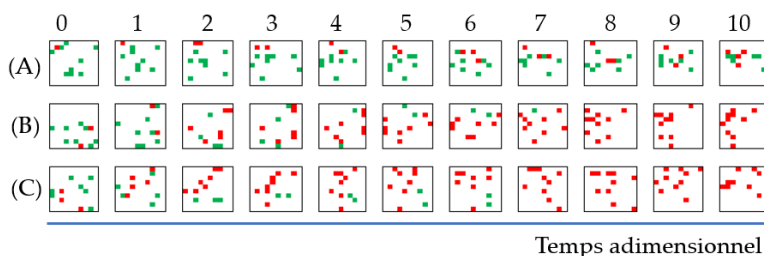


Figure 19. Méthode de Monte-Carlo appliquée à un espace carré avec un nombre variable de personnes malades : (A) : A $t = 0$, 1 seul infecté (rouge) avec des personnes saines (vert) ; (B) : 2 ; (C) : 3

La présence simultanée de plusieurs personnes porteuses du virus dans un espace clos peut avoir un effet amplificateur particulièrement efficace. Velarde et Robledo (2021) montrent l'importance de la distance entre individus sains et porteurs du virus. Ils ne cherchent pas une loi apparente d'interaction, mais utilisent leur modélisation pour faire des comparaisons entre Etats.

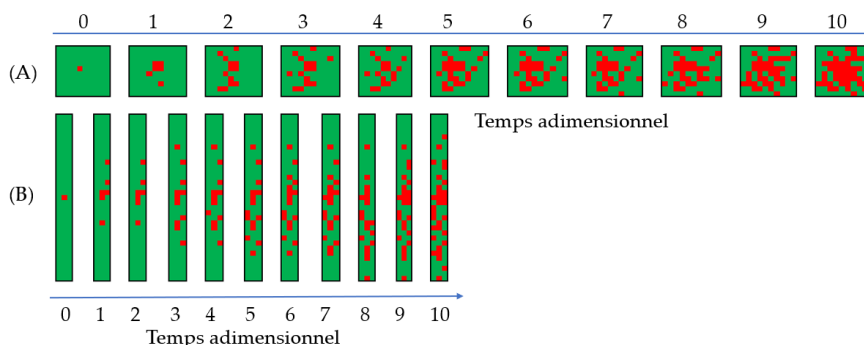


Figure 20. Méthode de Monte-Carlo appliquée à des espaces de formes différentes : carrée (A) ou allongée (B). La personne porteuse du virus (rouge) est placée au centre de gravité à $t = 0$.

Sur cet autre exemple (figure 20), l'espace est complètement rempli de personnes saines à $t = 0$ (sauf une), il est possible d'observer l'effet de la forme de l'espace dans lequel les personnes sont « enfermées ». Pour des temps (des tirs) identiques, la forme allongée a un effet de ralentissement de la vitesse de propagation du virus relativement à un espace carré... Peut-être vaut-il mieux ; toutes

choses égales par ailleurs, être dans le métro que dans une salle de bal ! (surtout avec masque dans le premier cas, et sans dans le second !).

Conclusion

« La démoralisation [peut] réduire la capacité à réfléchir de façon critique et à se défendre. Et ainsi, plus la population panique, plus elle est susceptible de relayer la désinformation » (Martin, 2022).

« Il est important d'analyser comment les enjeux de société, fortement martelés par les médias, peuvent entraîner (ou non) des formes de manipulations obscurantistes. Dans ce cadre, ce ne peut être la culture « commune », emprunte de socialement correct, les croyances partagées qui doivent imposer leur loi au scientifique et/ou à l'expert » (André, 2022 a).

« Le gouvernement est lié dans tous ses actes par des règles immuables et préétablies, règles qui permettent de prévoir avec certitude que, dans des circonstances déterminées, l'autorité exécutive s'exercera d'une façon déterminée » (Hayek, 2013).

« La pandémie virale que nous traversons aura été révélatrice de nombreuses fragilités, bien au-delà de la crise sanitaire. Dans ces moments chaotiques, nous découvrons nos forces, mais aussi nos faiblesses. Notre société a subi une véritable déflagration sociologique et psychologique qui rappelle que nous sommes en danger dans un monde qui n'a pourtant jamais autant maîtrisé de technologies » (Sibila, 2021). Pour la première fois dans l'histoire de notre pays, la population dans sa grande majorité a perdu la jouissance de ses droits inaliénables (cf. déclaration des droits de l'Homme et du Citoyen), pour se conformer à diverses règles sanitaires. « D'un régime de libertés protégé par le droit, nous sommes passés à un régime d'autorisation où les libertés sont devenues des récompenses de l'État pour s'être vacciné. La question ne porte pas ici sur l'efficacité des vaccins ou la dangerosité de la pandémie elle-même, mais sur ce que l'État s'est cru politiquement et juridiquement autorisé à faire au nom de l'urgence sanitaire » (Mas, 2022). Alors, faut-il forcer les gens à se faire vacciner ? L'idée, aussi ancienne que les vaccins eux-mêmes, ressurgit actuellement face au virus et creuse toujours de profonds clivages entre gardiens des libertés publiques et défenseurs de la sécurité sanitaire (Up Magazine, 2022). Dans les faits, le pic de la cinquième vague est semble-t-il derrière nous, les chiffres le confirment, et c'est encourageant. « On perd près de la moitié des cas par rapport à la semaine précédente et le nombre de nouvelles hospitalisations est en baisse de 20 % », affirme Yannick Simonin, virologue à l'université de Montpellier. Même s'il baisse rapidement, Omicron circule toujours. « Il faut rester prudent », ajoute le chercheur (Asseo, 2022). En fin février 2022, cette diminution se confirme toujours.

Le déploiement extrêmement rapide dans le monde occidental de vaccins sûrs et efficaces contre le virus a été déterminant pour contenir la pandémie (et être un facteur de protection de systèmes de santé fragiles), sauver des vies. Des mesures flexibles comme la distanciation physique et surtout le port de masques d'excellente qualité (FFP2 par exemple, mais, faute de mieux en tissu selon la norme AFNOR en vigueur), le lavage des mains apparaissent efficaces pour diminuer la présence de virus. C'est à l'évidence dommage que ces mesures de bon sens n'aient pas été considérées à l'arrivée du virus sur le sol national (cf. Muscillo, Pin et Razzolini, 2020), ce qui a conduit à des fermetures de lieux recevant du public et à des confinements sévères. Le modèle différentiel proposé vérifie ces considérations. Le masque a pu éviter des peurs de personnes proches de vous qui toussaient, mais qui n'avaient qu'un rhume passé, ce qui a pu introduire des peurs inutiles (Bouayed, 2022)... Dans le modèle continu, il n'est cependant pas fait mention de la présence de virus liée à l'arrivée de personnes infectées en France : on a considéré que des mesures avaient été prises pour ne pas en tenir compte, mais c'est bien par ce processus que la pandémie a démarré... Toutefois, cette remarque milite pour une vaccination totale et mondiale (en particulier si les personnes vaccinées peuvent exposer celles qui ne le sont pas).

Si le modèle différentiel est validé par des simulations de type « Monte-Carlo » pour la relation en termes de contagion par des personnes porteuses du virus vis-à-vis de personnes saines, les inégalités entre personnes disposant d'un confort de vie ne sont pas prises en considération (en particulier durant le confinement) (Tremblay, 2021). D'ailleurs, les méthodes de traçage qui auraient pu montrer ces différences de comportement (Krüger et al, 2022) n'ont pas été d'une grande utilité.

Erreurs de modes de protection des citoyens ou pas, selon Coladon (2022 b), le virus « Omicron » semble (enfin) nous oublier annonçant une possible sortie de la pandémie. Mais, alors, dans le très proche futur, le port du masque resterait cependant obligatoire dans les transports, alors que les discothèques seront réouvertes avec possibilité de participer à des concerts debout (sans masques ?) et il est à nouveau possible de consommer dans les stades, cinémas et transports (cf. figure 20...). Enfin, les bénéfices attendus du port du masque dans des zones peu denses ($\Omega = -\beta \sigma (1 - \kappa)$ proche de zéro) sont vraiment très faibles, lorsqu'ils ne sont pas inexistantes, surtout pour des personnes qui remettent le masque sans précaution dans leur poche ! Mais, rappelons-nous, l'effet était encore plus faible en présence d'un couvre-feu strict !

En tout état de cause, tout semble aller de mieux en mieux dans le « royaume » de France (ou plutôt de moins en moins mal pour ce qui concerne la pandémie), pendant que le Danemark reste encore fortement soumis à la pression du virus ou de l'un de ses variants (cf. Covid-19 Explorer, 2022). Souhaitons pour une fois que les frontières seront bien fermées... La vigilance doit être maintenue et puis, les 130.000 morts français du virus ne souhaitent pas voir leur nombre augmenter par des préventions inutiles ou inefficaces...

« Si on suit cette dynamique, [...] à la mi-mars, on pourrait commencer à se poser sérieusement la question du port du masque en intérieur, chez les adultes et les enfants » (Véran, Ministre de la santé, 2022).

« Les Danois ont levé les restrictions, le port du masque, les distinctions selon le statut vaccinal... Le virus a donc beaucoup plus de liberté pour circuler là-bas : c'est peut-être davantage cela qui ralentit la décrue que BA.2 [variant d'Omicron] » (Rouzioux, 2022).

« Il va falloir beaucoup de temps pour que le Sars-Cov-2 devienne aussi bénin que les autres coronavirus [...]. Nous vivrons encore longtemps avec le Sars-Cov-2, mais de façon différente » (Delfraissy, 2022).

« Je ne fais pas partie de ceux qui considèrent que l'Etat est omnipotent, omniscient, qu'il sait tout sur tout » (Attal, 2022).

Remerciements : Les auteurs remercient très sincèrement Pascal Jacquetin, Directeur adjoint à la Caisse Nationale d'Assurance Maladie pour ses avis et conseils avisés durant ce travail.

Références

- Adiga A., Dubhashi D., Lewis B., Marathe M., Venkatramanan S., Vullikanti A. (2020) "Mathematical Models for COVID-19 Pandemic: A Comparative Analysis" Journal of the Indian Institute of Science volume, 100, 793–807.
- Addactis (2020) « Covid-19 : De la modélisation épidémiologique au Machine Learning » <https://www.addactis.com/fr/impact-sanitaire-covid-19-modelisation-epidemiologique-machine-learning/>
- AFP – Agence Française de Presse (2022 a) « La vaccination anti-Covid pour tous, désormais une réalité en Autriche » https://www.sciencesetavenir.fr/sante/covid-la-vaccination-pour-tous-desormais-une-realite-en-autriche_161208
- AFP – Agence Française de Presse (2022) « Coronavirus: le point sur la pandémie dans le monde » <https://www.la-croix.com/Coronavirus-point-pandemie-monde-2022-02-05-1301198768>

- AIP -American Institute of Physics (2020) “Modeling COVID-19 data must be done with extreme care, scientists say” <https://phys.org/news/2020-05-covid-extreme-scientists.html>
- Alizon S., Sofonea M.T. (2021 a) « Pourquoi il y a peu de chances pour que le coronavirus SARS-CoV-2 perde sa virulence » The Conversation - <https://theconversation.com/pourquoi-il-y-a-peu-de-chances-pour-que-le-coronavirus-sars-cov-2-perde-sa-virulence-166835>
- Alizon S., Sofonea M.T. (2021) “SARS-CoV-2 virulence evolution : A virulence theory, immunity and trade-offs” Journal of Evolutionary Biology, 2021, 1–11.
- André J.C. (2022) « Consensus/vérité » Environnement, Risques et Santé, sous presse.
- André J.C. (2022) « Expertise et formes d'idéologies : Pas tous coupables, mais souvent responsables ? » Environnement, Risques et Santé, sous presse.
- Andronico A., Tran Kiem C., Bosetti P., Paireau J., Fontanet A., Cauchemez S. (2021) « Impact du variant Omicron sur l'épidémie COVID-19 et son contrôle en France métropolitaine durant l'hiver 2021-2022 » https://modelisation-covid19.pasteur.fr/variant/Institut_Pasteur_Impact_dOmicron_sur_lepidemie_francaise_20211227.pdf
- ANSES (2021) « Covid-19 : quelle viabilité du virus SARS-CoV-2 dans l'air ? » <https://www.anses.fr/fr/content/covid-19-quelle-viabilit%C3%A9-du-virus-sars-cov-2-dans-l%E2%80%99air>
- ANSES (2021 a) « Note d'appui scientifique et technique de l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail relatif à la viabilité dans l'air et la dose infectante du virus SARS-COV-2 » <https://www.anses.fr/fr/system/files/AIR2021SA0018.pdf>
- Apolloni B. (2021) “Inferring statistical trends of the COVID19 pandemic from current data. Where probability meets fuzziness” Information sciences, 574, 333-348.
- Asseo M. (2022) « Covid-19 : après la cinquième vague, l'avenir de la pandémie reste incertain » <https://www.la-croix.com/Sciences-et-ethique/Covid-19-cinquieme-vague-lavenir-pandemie-reste-incertain-2022-02-15-1201200534>
- Attal G. (2022) cité par Nadeau L. « « Cabinet de conseil de l'État en interne » : Gabriel Attal à un cheveu d'inventer l'administration » <https://www.marianne.net/politique/gouvernement/cabinet-de-conseil-de-letat-en-interne-gabriel-attal-a-un-cheveu-dinventer-ladministration>
- Bastidon C., Parent A. (2021) « La modélisation économique à l'appui du choix public dans l'urgence de la pandémie de covid-19 - Une revue de littérature » Revue de l'OFCE, 173, 5-32.
- Basu S. (2021) "Computational characterization of inhaled droplet transport to the nasopharynx" Science Reports, 11, 6652.
- Bayette C., Monticelli M. (2021) « Modélisation d'une épidémie, partie 1 - Comment les maths aident à la prise de décision » <http://images.math.cnrs.fr/Modelisation-d-une-epidemie-partie-1.html> et « Modélisation d'une épidémie, partie 2 - Autres modèles et résolution numérique » <http://images.math.cnrs.fr/Modelisation-d-une-epidemie-partie-2.html>
- Beck U. (2003) « La société du risque – Sur la voie d'une autre modernité» Flammarion – Champs Ed. - Paris.
- Benveniste A., Gouzènes L. – Academie des Technologies (2021) « COVID - 19 : Modélisations et Données pour la gestion de Crises sanitaires » Académie des technologies Ed. – Paris.
- Berger Q., Caravenna F. (2021) « Le paradoxe de Simpson illustré par des données de vaccination contre le Covid-19 » The Conversation - <https://theconversation.com/le-paradoxe-de-simpson-illustre-par-des-donnees-de-vaccination-contre-le-covid-19-170159>
- Bertozzi A.L., Franco E., Mohler G., Short M.B., Sledge D. (2020) “The challenges of modeling and forecasting the spread of COVID-19” Proceedings of the national Academy of Science, 117, 16732-16738.
- Blondel S., Chyderiotis S., Langot F., Mueller J., Sicsic J. (2021) « Préférences et décisions face à la COVID-19 en France : télétravail, vaccination et confiance dans la gestion de la crise par les autorités » <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03117874>
- Bordignon F., Ermakova L., Noel M. (2021) “Over-promotion and caution in abstracts of preprints during the COVID-19 crisis” Learned Publishing, 34, 622-636.
- Bourg D., Schlegel J.L. (2001) « Parer aux risques de demain : le principe de précaution » Seuil Ed. – Paris.

- Bouayed J. (2022) “Sorry, I am sneezing and coughing but I do not have COVID-19” Brain, Behavior, and Immunity, 101, 57–58.
- Britton T., O’Neill P.D. (2002) “Bayesian inference for stochastic epidemics in populations with random social structure” Scandinavian Journal of Statistics, 29, 375–390.
- Brunet M. (2022) « Les trois scénarios de la suite de l’épidémie de Covid-19 » <https://www.marianne.net/societe/sante/les-trois-scenarios-de-la-suite-de-lepidemie-de-covid-19>
- Calleri F., Nastasi G., Romano V. (2021) “Continuous-time stochastic processes for the spread of COVID-19 disease simulated via a Monte Carlo approach and comparison with deterministic models” Journal of Mathematical Biology, 14, 34.
- Castro M., Ares S., Cuesta J.A., Manrubia S. (2020) “The turning point and end of an expanding epidemic cannot be precisely forecast” Proceedings of the National Academy of Science, 117, 26190-26196.
- Chazelet S., Pacault S. (2021) “Efficiency of Community Face Coverings and Surgical Masks to Limit the Spread of Aerosol” Annals of Work Exposures and Health - <https://doi.org/10.1093/annweh/wxab089>
- Chateauraynaud F., Torny D. (1999) « Les sombres précurseurs » Ed. de l'EHESS – Paris.
- Castex J. (2022) cité par Jolain F. « Père Castex raconte nous des histoires » <https://www.contrepoints.org/2022/02/21/422020-pere-castex-raconte-nous-des-histoires>
- Coladon M. (2022) « Omicron : nouveau symptôme constaté chez des patients » https://lasanteauquotidien.com/coronavirus-covid-19/omicron-nouveau-symptome-constate-chez-des-patients/?utm_source=fox&utm_medium=email&utm_content=sante-quot-502
- Coladon M. (2022 a) « Covid-19 : l’eau du robinet peut-elle être positive ? » https://lasanteauquotidien.com/fake-news/covid-19-leau-du-robinet-peut-elle-etre-positive/?utm_source=fox&utm_medium=email&utm_content=sante-quot-480
- Coladon M. (2022 b) « Le port du masque en intérieur : c’est bientôt fini ! » https://lasanteauquotidien.com/coronavirus-covid-19/le-port-du-masque-en-interieur-cest-bientot-fini/?utm_source=fox&utm_medium=email&utm_content=sante-quot-514
- Collectif SMI (1995) « L’adéquation fonctionnelle comme limite des systèmes organisateurs » 58-67 in G. Théraulaz Ed. « Evolution et organisation ; hasard et contraintes dans la genèse des formes collectives » Journées de Rochebrune et ENST Ed. – Paris. <http://perso.telecom-paristech.fr/~evolang/Rochebrune/Rochebrune%201995%20-%20Evolution%20et%20Organisation.pdf>
- Cordonier L., Brest A. (2021) « Comment les Français s’informent-ils sur Internet ? Analyse des comportements d’information et de désinformation en ligne » Fondation Descartes https://www.fondationdescartes.org/wp-content/uploads/2021/03/Etude_Information_Internet_FondationDescartes_2021.pdf
- Costagliola C. (2022) « Croire que cette vague sera la dernière, c'est de la pensée magique » https://www.lexpress.fr/actualite/sciences/omicron-croire-que-cette-vague-sera-la-derniere-c-est-de-la-pensee-magique_2165655.html
- Costagliola D. (2022) « Croire que cette vague sera la dernière, c'est de la pensée magique » https://www.lexpress.fr/actualite/sciences/omicron-croire-que-cette-vague-sera-la-derniere-c-est-de-la-pensee-magique_2165655.html
- Covid-19 Explorer (2022) “Daily new confirmed COVID-19 cases per million people” <https://ourworldindata.org/explorers/coronavirus-data-explorer?zoomToSelection=true&time=2021-12-05..latest&facet=none&pickerSort=asc&pickerMetric=location&Metric=Confirmed+cases&Interval=7-day+rolling+average&Relative+to+Population=true&Color+by+test+positivity=false&country=FRA~DNK>
- Dallaporta B. (2021) « La Pandémie-Covid19 : le tragique n’est pas là où on croit » La Pensée écologique, 7, 17-26.
- de Villiers P. (2021) « [II] en remet une couche sur le Transhumanisme sur CNews » <https://iatranshumanisme.com/2021/12/20/philippe-de-villiers-en-remet-une-couche-sur-le-transhumanisme-sur-cnews/>
- Delfraissy J.F. cité par Coladon M. « Covid-19 : « On est au début d’une nouvelle ère » » https://lasanteauquotidien.com/coronavirus-covid-19/covid-19-on-est-au-debut-dune-nouvelle-ere/?utm_source=fox&utm_medium=email&utm_content=sante-quot-515
- Desroches A., Leroy A., Vallée F. (2003) « La gestion des risques » Lavoisier Ed. - Paris.

- Di Domenico L., Pullano G., Sabbatini C.E., Boëlle P.Y., Colizza V. (2020) “Impact of lockdown on COVID-19 epidemic in Île-de-France and possible exit strategies“ BMC Medicine, 18, 240.
- Djidjou-Demasse R., Selinger C., Sofonea M.T. (2020) « Epidémiologie mathématique et modélisation de la pandémie de Covid-19 : enjeux et diversité » Revue Francophone des Laboratoires, 526, 63–69.
- Dong E., Du H., Gardner L. (2020) “An interactive web-based dashboard to track COVID-19 in real time” Lancet Infectious Diseases, 20, 533–534.
- Eikenberry S.E., Mancuso M., Iboi E., Phan T., Eikenberry K., Kuang Y., Kostelich E., Gumel A.B. (2020) “To mask or not to mask: Modeling the potential for face mask use by the general public to curtail the COVID-19 pandemic” Infectious Disease Modelling, 5, 293-308.
- Egilmez G., Tatari O. (2012) “A dynamic modeling approach to highway sustainability: Strategies to reduce overall impact” Transportation Research, Part A: Policy and Practice, 46, 1086-1096.
- Faranda D., Pérez Castillo I., Hulme O., Jezequel A., Lamb J.S.W., Sato Y., Thompson E.L. (2020) “Asymptotic estimates of SARS-CoV-2 infection counts and their sensitivity to stochastic perturbation” Chaos, 30, 051107.
- Fatès N. (2007) « A la découverte des automates cellulaires » <https://interstices.info/a-la-decouverte-des-automates-cellulaires/>
- Ferguson N.M., Laydon D., Nedjati-Gilani G., Imai N. Ainslie K., Baguelin M., Bhatia S., Boonyasiri A., Cucunubá Z., Cuomo-Dannenburg G., Dighe A. (2020) “Report 9: Impact of non-pharmaceutical interventions (NPIs) to reduce COVID-19 mortality and healthcare demand” Preprints - Imperial College COVID-19 Response Team - <https://www.imperial.ac.uk/media/imperial-college/medicine/sph/ide/gida-fellowships/Imperial-College-COVID19-NPI-modelling-16-03-2020.pdf>
- Figeac-Monthus M. (2021) « La crise de la COVID 19 : « un évènement monstre » au service de la mémoire collective » 7-14 in Bergugnat L. Ed. « Des professionnels face à la pandémie - Un devoir de mémoire » Champ social Ed. – Paris.
- Follett M.P. (1949) “Freedom and coordination – Lectures in business organization management” Publication Trust Ltd. Ed. – London - UK.
- Fontanet A. (2021) « Covid19 : On ne se sortira de cet enfer que quand on aura atteint l’immunité collective et ce sera par le vaccin » https://www.francetvinfo.fr/sante/maladie/coronavirus/vaccin/video-covid-19-on-ne-sortira-de-cet-enfer-que-quand-on-aura-atteint-l-immunite-collective-et-ce-sera-par-le-vaccin-estime-le-professeur-arnaud-fontanet_4244017.html
- Fontanet A. (2022) cité par « la Provence » - « Coronavirus : la cinquième vague reflue mais la suite reste incertaine » <https://www.laprovence.com/actu/en-direct/6657012/coronavirus-la-cinquieme-vague-reflue-mais-la-suite-reste-incertaine.html>
- Foucault M. (1978-1979) « Résumé du cours au Collège de France, - Dits & Ecrits 1954-1988 » Tome 3 Gallimard Ed. -Paris.
- Foucault M. (2021) « Gouverner par l’épidémie » EcoRev', 50, 9-15.
- Fourquet J., Cassely J.F. (2021) « La France sous nos yeux... Economie, paysages, nouveaux modes de vie » Seuil Ed. – Paris.
- Fraser N., Brierley L., Dey G., Polka J.K., Pálffy M., Nanni F., Coates J.A. (2021) “The evolving role of preprints in the dissemination of COVID-19 research and their impact on the science communication landscape” PLOS Biology, <https://journals.plos.org/plosbiology/article?id=10.1371/journal.pbio.3000959>
- Frenkel G., Schwartz M. (2021) “Modeling social distancing and “spontaneous” infection in an epidemic outbreak phase — Application to the 2020 pandemic” Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 567, 125727.
- Garcia J., Torres C., Barbieri M., Camarda C.G., Cambois E., Caporali A., Meslé F., Poniakina S., Robine J.M. (2021) « Différences de mortalité par Covid-19 : conséquence des imperfections et de la diversité des systèmes de collecte des données » Population, 76, 37-76.
- Gauchet M. (2002) « La démocratie contre elle-même » Gallimard Ed. - Paris.
- Gaudillière J.P., Izambert C., Juven P.A. (2021) « Pandémopolitique, Réinventer la santé en commun » La Découverte Ed. – Paris.
- Giddens A. (1994) «Les conséquences de la modernité» L’Harmattan Ed. - Paris.

- Groendyke C., Welch D., Hunter D.R. (2011) “Bayesian inference for contact networks given epidemic data” *Scandinavian Journal of Statistics*, 38, 600–616.
- Guo X., Gupta A., Sampat A., Zhai C. (2022) “A stochastic contact network model for assessing outbreak risk of COVID-19 in workplaces” *PLOS ONE* <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0262316>
- Hayek F. (2013) « La route de la servitude » PUF Ed. – Paris.
- Herby J., Jonung L., Hanke S.H. (2022) “A Literature Review and Meta-Analysis of the Effects of Lockdowns on COVID-19 Mortality” <https://sites.krieger.jhu.edu/iae/files/2022/01/A-Literature-Review-and-Meta-Analysis-of-the-Effects-of-Lockdowns-on-COVID-19-Mortality.pdf>
- Hirsch E. (2004) « Responsabilités scientifiques, responsabilités éthiques ; quels repères » 11-12 in B. Debuire et E. Hirsch Éd. « La recherche peut-elle se passer d'éthique? » Vuibert E. - Paris.
- Hirsch M. (2002) « Ces peurs qui nous gouvernent » A. Michel Ed. - Paris.
- Hoertel N., Blachier M., Blanco C., Olfson M., Massetti M., Sánchez Rico M., Limosin F., Leleu H. (2020) “A stochastic agent-based model of the SARS-CoV-2 epidemic in France” *Nature Medicine*, 26, 1417–1421.
- Holmdahl I., Buckee C. (2020) “Wrong but Useful — What Covid-19 Epidemiologic Models Can and Cannot Tell Us” *The New England Journal of Medicine*, 383, 303-305.
- INRS (2022) « Masques de protection respiratoire et risques biologiques : foire aux questions » <https://www.inrs.fr/risques/biologiques/faq-masque-protection-respiratoire.html>
- INSEE (2021) « Naissances et taux de natalité » <https://www.insee.fr/fr/statistiques/2381380>
- INSEE (2021 a) « Décès et taux de mortalité » <https://www.insee.fr/fr/statistiques/2383440>
- Je vote pour la science (2022) « Non vaccinés: taxer ou chercher à comprendre? » <https://www.sciencepresse.qc.ca/vote-pour-science/2022/02/02/non-vaccines-taxer-chercher-comprendre>
- John Hopkins University (2019) “COVID-19 Data Repository by the Center for Systems Science and Engineering (CSSE) at Johns Hopkins University - Novel Coronavirus (COVID-19) Cases Data” <https://data.humdata.org/dataset/novel-coronavirus-2019-ncov-cases>
- John Hopkins University (2022) “COVID-19 Dashboard” <https://coronavirus.jhu.edu/map.html>
- Kahn S. (2022) « Lettre de Bruxelles - La Pandémie de Covid-19, quelles leçons pour L'union Européenne » L'Aurore du Bourbonnais - https://www.robert-schuman.eu/fr/doc/actualites/20220128_LAuroreDuBourbonnais.pdf
- Keck F. (2010) « Un monde grippé : Enquête sur une peur collective » Flammarion Ed. – Paris.
- Kermack W.O., McKendrick A.G. (1927) “A contribution to the mathematical theory of epidemics” *Proceedings of the Royal Society of London*, A115, 700–721.
- Krishna B. (2022) « Pourquoi Omicron pourrait être le dernier variant « préoccupant » » <https://www.contrepoints.org/2022/01/08/418730-pourquoi-omicron-pourrait-etre-le-dernier-variant-preoccupant>
- Krüger N., Behne A., Beinke J.H., Stibe A., Teuteberg F. (2022) “Exploring User Acceptance Determinants of COVID-19-Tracing Apps to Manage the Pandemic” *International Journal of Technology and Human Interaction*, 18 - <https://www.igi-global.com/pdf.aspx?ctid=4&isxn=&oa=true&ptid=277505&tid=293197>
- Ladet N. (2020) « La modélisation en pratique dans la gestion d'une épidémie » <https://www.inrae.fr/actualites/modelisation-pratique-gestion-dune-epidemie>
- Latour B. (1984) « Les Microbes - Guerre et paix » Métailié Ed. – Paris.
- Laville E. (2002) « L'entreprise verte » Village mondial Ed. - Paris.
- Lavis A. (2021) « L'Imprévu - Que faire lorsqu'on ne sait plus ? » Autrement Ed. – Paris.
- McGrail D.J., Dai J., McAndrews K.M., Kalluri R. (2020) “Enacting national social distancing policies corresponds with dramatic reduction in COVID19 infection rates” *PLoS ONE*, 15, e0236619.
- Mallet L. (2020) « La pandémie de covid-19 : une histoire de cloches, de marteaux et de clous » <https://www.institutmomentum.org/la-pandemie-une-histoire-de-cloches-de-marteaux-et-de-clous/>
- Marchand P. (2022) cité par Cappelli P. « Solutions Solidaires: analyse - Crise sanitaire: l'heure de régler les fractures » https://www.liberation.fr/plus/crise-sanitaire-lheure-de-regler-les-fractures-20220205_MSK2JD7UF5GCBLOEZZMK2LW3LM/

- Marchard P. (2022) « Covid : 157 articles scientifiques ont été rétractés depuis le début de la pandémie » <https://www.egora.fr/actus-pro/recherche/71333-covid-157-articles-scientifiques-ont-ete-retractes-depuis-le-debut-de-la>
- Martin G. (2022) « La technologie est géopolitique » <https://www.contrepoints.org/2022/02/15/421687-la-technologie-est-geopolitique>
- Mas F. (2022) « Abolition du pass vaccinal, abolition de l'état d'urgence sanitaire » <https://www.contrepoints.org/2022/02/15/421745-abolition-du-pass-vaccinal-abolition-de-letat-durgence-sanitaire>
- Maslow (1966) "The Psychology of Science: A Reconnnaissance" Harper & Row Ed., Collection « John Dewey Society lectureship series » 15-16 – New-York – USA.
- Maurice O. (2021) « La gestion de la crise covid : gouverner par la peur » <https://www.contrepoints.org/2021/11/27/415047-la-gestion-de-la-crise-covid-gouverner-par-la-peur>
- May R.M., Anderson R.M. (1987) "Transmission dynamics of HIV infection" Nature, 326, 137-142.
- Meadows D.H., Randers J., Meadows D.L. (1993) "320 Beyond the Limits: Confronting Global Collapse, Envisioning a Sustainable Future" Chelsea Green Publishing Company Ed. – Chelsea – UK.
- Meadows D.H., Randers J., Meadows D.L. (2004) "368 Limits to Growth: The 30-Year Update" Chelsea Green Publishing Company Ed. – Chelsea – UK.
- Meyer N.M.P. (2022) « Pass vaccinal : Vérans nous la joue Tartuffe et Diafoirus » <https://www.contrepoints.org/2022/02/06/421056-pass-vaccinal-verans-nous-la-joue-tartuffe-et-diafoirus>
- Muscillo A., Pin P., Razzolini T., Brandelli-Costa A. (2020) "Covid19: Unless one gets everyone to act, policies may be ineffective or even backfire" PloS one, 15, e0237057.
- Neagu A., Kosztin I., Jakab K., Barz B., Neagu M., Jamison R. (2006) "Computational modeling of tissue self-assembly" Modern Physics Letters B, 20, 1217.
- Niño-Torres D., Ríos-Gutiérrez A., Arunachalam V., Ohajunwa C., Seshaiyer P. (2022) "Stochastic modeling, analysis, and simulation of the COVID-19 pandemic with explicit behavioral changes in Bogotá: A case study" Infectious Disease Modelling, 7, 199-211.
- Nietzsche F. (1974) « Crépuscule des idoles » in « Œuvres philosophiques » Gallimard Ed. - Paris.
- Nietzsche F. (1991) « Par-delà le bien et le mal » Le Livre de Poche Ed. – Paris.
- OSCOUR – IdF - Ile de France (2022) « Point Epidémiologie Régional en Ile-de-France - Spécial COVID-19 » Santé Publique France - 13 Janvier 2022/ S01/ N°91.
- Pageot V. (2022) « Covid-19 : les raisons d'être optimiste » https://lasanteauquotidien.com/coronavirus-covid-19/covid-19-les-raisons-detre-optimiste/?utm_source=fox&utm_medium=email&utm_content=sante-quot-506
- Pontoizeau P.A. (2021) « Hiérarchie des épidémies et disproportion des mesures sanitaires » <https://www.francesoir.fr/opinions-tribunes/hierarchie-des-epidemies-et-disproportion-des-mesures-sanitaires>
- Rainisch G., Undurraga E.A., Chowell G. (2020) "A dynamic modeling tool for estimating healthcare demand from the COVID19 epidemic and evaluating population-wide interventions" International Journal of Infectious Diseases, 96, 376–383.
- Rémond J., Rémond Y. (2020) "A New Virus-Centric Epidemic Modeling Approach 1. General Theory and Machine Learning Simulation of 2020 SARS COV-2 (Covid-19) For Belgium, France, Italy, and Spain" Mathematics and Mechanics of Complex Systems, 8, 233-247.
- Ricœur P. (1965) « De l'interprétation - Essai sur Freud » Seuil Ed. – Paris.
- Rouchier J. (2022) « Les modèles épidémiologiques pourraient-ils être (un peu plus) utiles ? » International Covid Summit – Marseille & Massy <https://crowdbunker.com/v/6GQSaZ41>
- Rouchier J., Barbet V. (2020) « La diffusion de la Covid-19. Que peuvent les modèles ? » Editions Matériologiques – Paris.
- Rouzioux C. (2022) citée par Perru A., Brunet M. « La France tombera le masque à l'intérieur à la mi-mars : trop tôt ou trop tard ? » <https://www.marianne.net/societe/sante/la-france-tombera-le-masque-a-linterieur-a-la-mi-mars-trop-tot-ou-trop-tard>

- Saltelli A., Bammer G., Bruno I., Charters E., Di Fiore M., Didier E., Espeland W.N., Kay J., Lo Piano S., Mayo D., Pielke Jr R., Portaluri T., Porter T.M., Puy A., Rafols I., Ravetz J.R., Reinert E., Sarewitz D., Stark P.B., Stirling A., van der Sluijs J., Vineis P. (2020) “Five ways to ensure that models serve society: a manifesto” <https://www.nature.com/articles/d41586-020-01812-9>
- Santé Publique France (2022) « Coronavirus : chiffres clés et évolution de la COVID-19 en France et dans le Monde » <https://www.santepubliquefrance.fr/dossiers/coronavirus-covid-19/coronavirus-chiffres-cles-et-evolution-de-la-covid-19-en-france-et-dans-le-monde>
- Schaer E., André J.C. (2020) “Process Engineering Renewal – Volume 1: Background and Training ; Volume 2; Research – Volume 3; Prospects” ISTE/Wiley Ed. London – UK.
- Schultz E., Blanchard A. (2022) « Les Français et la chloroquine, une défaite de la culture scientifique ? » <https://theconversation.com/les-francais-et-la-chloroquine-une-defaite-de-la-culture-scientifique-174482>
- Schur (2021) “Pandemic Equation for Describing and Predicting COVID19 Evolution” Journal of Healthcare Informatics Research, 5, 168–180.
- Sibilía J. (2021) « L’homme et son environnement : de l’émerveillement à l’action - Comment faire de la santé environnementale un enjeu majeur ? » sous presse.
- Simon H.S. (1969) “The Sciences of the Artificial: Third Edition” The MIT Press Ed. – Cambridge - USA.
- Sofonea M. (2021) citée dans d'Aversa M. « Les arrangements des politiques avec les modélisations du Covid-19 » <http://www.slate.fr/story/207257/arrangements-politiques-modelisations-covid-19-previsions-epidemie-decisions-mesures>
- Srivastav A.K., Stollenwerk N., Aguiar M. (2022) “Deterministic and Stochastic Dynamics of COVID-19: The Case Study of Italy and Spain” Computational and Mathematical Methods, 2022, Article ID 5780719.
- Stoop P. (2021) « COVID-19, data intelligence et modélisation : le difficile passage de la donnée à l’information et à la prévision » <http://labs.itk.fr/2020/03/27/covid-19-data-intelligence-et-modelisation-le-difficile-passage-de-la-donnee-a-linformation-et-a-la-prevision/>
- Subramanian S.V., Kumar A. (2021) “Increases in COVID-19 are unrelated to levels of vaccination across 68 countries and 2947 counties in the United States” European Journal of Epidemiology, 36, 1237–1240.
- Tabb K. (2007) « La téléologie de Darwin » Natures Sciences Sociétés, 15, 287-290.
- Taleb N.N. (2011) « Le Cygne noir, la puissance de l’imprévisible » Les Belles Lettres Ed. – Paris.
- Tarde G. (2001) « Les Lois de l’imitation. Étude sociologique [1890] » Les Empêcheurs de penser en rond Ed. – Paris.
- Tremblay M.C. (2021) “Cultural safety: a key concept for health promotion in times of Covid-19 and systemic racism ‘syndemic’” Health Promotion International, 36, 517–1520.
- Tucille J.D. (2022) « Les confinements ont coûté cher pour sauver peu de vies » <https://www.contrepoints.org/2022/02/07/421082-les-confinements-ont-coute-cher-pour-sauver-peu-de-vies>
- UP Magazine (2022) « Vaccination obligatoire : les leçons de l’Histoire » <https://up-magazine.info/en/le-vivant/sciences/99009-vaccination-obligatoire-les-lecons-de-lhistoire/>
- Up Magazine (2022 a) « Peut-on attraper le Covid-19 plusieurs fois ? » <https://up-magazine.info/en/le-vivant/sciences/98724-peut-on-attraper-le-covid-19-plusieurs-fois/>
- Velarde C., Robledo A. (2021) “Statistical mechanical model for growth and spread of contagions under gauged population confinement” Physica, A573, 125960.
- Véran O. (2022) cité par Perru A., Brunet M. « La France tombera le masque à l’intérieur à la mi-mars : trop tôt ou trop tard ? » <https://www.marianne.net/societe/sante/la-france-tombera-le-masque-a-linterieur-a-la-mi-mars-trop-tot-ou-trop-tard>
- Wang Y., Sun Q. (2013) “Modeling and simulations of multicellular aggregate self-assembly in bio-fabrication using kinetic Monte Carlo methods” Soft Matter, 9, 2172.