

139/140

REVUE D'ÉCONOMIE FINANCIÈRE

REVUE TRIMESTRIELLE
DE L'ASSOCIATION D'ÉCONOMIE
FINANCIÈRE, N° 139/140
3^e et 4^e TRIMESTRES 2020

NUMÉRO
SPÉCIAL

L'ÉCONOMIE, LA FINANCE
ET L'ASSURANCE
APRÈS LA COVID-19

Risques
Les cahiers de l'assurance

ASSOCIATION D'ÉCONOMIE FINANCIÈRE

Association régie par la loi du 1^{er} juillet 1901, déclarée le 11 mai 1987 (J.O. du 3 juin 1987)

Siège social : 56, rue de Lille, 75007 Paris.

MEMBRES

Membres : Agence française de développement, Association française de la gestion financière, Amundi, Autorité des marchés financiers, Autorité des normes comptables, Autorité marocaine du marché des capitaux, Axa, Banque de France, Banque Delubac & Cie, Banque européenne d'investissement, Barclays, BlackRock, BNP Paribas, Bouygues, Bredin Prat, Candriam, Citi, CNP Assurances, Covea, Crédit Agricole, Crédit Mutuel, Deutsche bank, Direction générale du Trésor, Fédération bancaire française, Goldman Sachs Paris Inc. & Cie, Groupe Caisse des Dépôts, HSBC, Idinvest, Kepler Corporate Finance, La Banque Postale, Lazard Frères, Morgan Stanley, Natixis, Paris Europlace, Scor, Société Générale, UniCredit.

CONSEIL D'ADMINISTRATION

Président : Robert Ophèle, *Président, Autorité des marchés financiers*

Membres de droit : Autorité des marchés financiers, Banque de France,
Direction générale du Trésor, Groupe Caisse des Dépôts.

Membres administrateurs : Amundi, Association française de la gestion financière, Axa, Bouygues, Bredin Prat, Covea, Fédération bancaire française, HSBC, La Banque Postale, Morgan Stanley.

Délégué général de l'Association : Sylvain de Forges

Trésorier de l'Association : Olivier Bailly

CONSEIL D'ORIENTATION

Présidents d'honneur

Jean-Claude Trichet, Christian Noyer

Président : François Villeroy de Galhau, *Gouverneur, Banque de France*

Jean-Pascal Beaufret, *Managing director, Goldman Sachs Paris*

Afif Chelbi, *Président honoraire, Conseil d'analyses économiques tunisien*

Benoît Cœuré, *Member of the Executive Board, Banque centrale européenne*

Ambroise Fayolle, *Vice-Président, Banque européenne d'investissement*

Bernard Gainnier, *Président, PwC France*

Antoine Gosset-Grainville, *Avocat à la Cour, BDGS Associés*

Olivier Guersent, *Directeur général, COMP-UE*

Nezha Hayat, *Présidente, Autorité marocaine du marché des capitaux*

Hans-Helmut Kotz, *CFS, Université Goethe, Francfort*

Eric Lombard, *Directeur général, Groupe Caisse des Dépôts*

Pascal Grangé, *Directeur financier, Bouygues*

Robert Ophèle, *Président, Autorité des marchés financiers*

Alain Papiasse, *Chairman CIB, BNP Paribas*

Olivier Pastré, *Conseiller scientifique REF ; Professeur émérite, Paris 8*

Patricia Plas, *Directrice des Affaires publiques et des Relations institutionnelles, Axa*

Emmanuel Moulin, *Directeur général, Direction générale du Trésor*

Rémy Rioux, *Directeur général, Agence française de développement*

Patrick Soulard, *Directeur général, Unicredit*

Augustin de Romanet, *Président, Paris Europlace*

Jean-Luc Tavernier, *Directeur général, Insee*

Didier Valet, *Vice-Président Industrie, Institut Louis Bachelier*

Claire Waysand, *Directrice générale adjointe, Engie*

Les membres du Conseil d'administration sont invités à participer au Conseil d'orientation.

HISTOIRE DES MODÈLES PANDÉMIQUES

Pierre-Charles Pradier

Université Paris 1 – Panthéon-Sorbonne et LabEx ReFi

■ Deux moments remarquables ont constitué l'épidémiologie en science expérimentale : la modélisation par Daniel Bernoulli de la diffusion d'une maladie dans une population à l'aide d'une équation différentielle en 1760 ; l'élaboration d'un modèle de causalité « probabiliste » dans l'entre-deux-guerres. Alors qu'ils n'ont jamais été entièrement intégrés à la formation des médecins en France, les prérequis de ces approches sont désormais enseignés en classe de terminale.

■ A (VERY SHORT) HISTORY OF PANDEMIC MODELS

Epidemiology evolved into an empirical science with two quantum leaps: in 1760, Daniel Bernoulli modelled the diffusion of a disease in a population using a differential equation then in the inter-war period a "probabilistic" model of causality emerged. Although they have never been fully integrated into medical school training in France, the prerequisites of these approaches are now taught in the final year of high school.

L'insistance des médias français à inviter des médecins pour commenter l'épidémie de coronavirus pourrait laisser croire que l'épidémiologie est une faculté naturelle aux médecins plutôt qu'une spécialité dont seulement certains seraient capables. Le dictionnaire de l'Académie française indique bien qu'il s'agit d'un terme de médecine avant de la définir comme l'« étude de la fréquence, de la répartition géographique et des conditions d'apparition des maladies ». S'il est certain que les médecins ont pendant des millénaires recensé les cas de maladies et leur distribution dans le temps et l'espace, cette statistique médicale empirique a été transfigurée par la révolution scientifique. Deux moments sont particulièrement importants dans cette évolution : la modélisation mathématique par Daniel Bernoulli (1760) de la

diffusion d'une maladie dans une population d'une part et d'autre part la reconnaissance du tabac comme cause du cancer du poumon au début des années 1950 dans les pays anglophones [Parascandola, 2011]. Dans ce dernier cas, la tension avec la médecine est particulièrement manifeste puisque l'évolution de la notion de causalité dans l'entre-deux-guerres est loin d'avoir conquis les institutions médicales, en particulier l'Académie de médecine en France qui reste longtemps attachée à une vision déterministe. Cette histoire où le développement de la modélisation mathématique d'une part et d'autre part une « révolution probabiliste » dans le recours aux données de l'expérience transforment la nature des disciplines est largement partagée dans les sciences sociales : on peut alors se demander si l'épidémiologie existe comme spécialité distincte, puisqu'elle n'est manifestement pas perçue comme telle par le public... C'est l'occasion de

s'interroger aussi sur le lectorat potentiel des recherches en épidémiologie et la réception par le public de ces recherches, depuis l'époque de Bernoulli jusqu'à nos jours.

Bernoulli et l'inoculation de la petite vérole

Le texte de Daniel Bernoulli sur l'inoculation de la variole a été abondamment commenté au cours des dix dernières années (notamment par Jean-Pierre Gabriel et Nicolas Bacaër). Pour les historiens des sciences, il est remarquable de trouver dans ce texte de 1760 les prémices du modèle dit SIR développé dans les années 1920 par Kermack et McKendrick. En effet, Daniel Bernoulli présente explicitement dans une table de survie la population de l'année n comme étant la somme des susceptibles (« n'ayant pas eu la petite vérole »), des infectés (« prenant la variole dans l'année ») et des remis (« ayant eu la petite vérole »). Etant entendu (par hypothèse) que les derniers ne seront pas réinfectés, il convient donc de les distinguer des (personnes) susceptibles (de contracter la maladie). Cette tripartition de la population est indéniablement celle des modèles SIR (qu'on nomme aussi « compartimentaux » car chaque personne d'une population est inscrite dans un compartiment). Daniel Bernoulli décrit non moins indéniablement la dynamique de ces populations à l'aide d'équations différentielles. Il anticipe en cela le développement de l'épidémiologie mathématique au XX^e siècle : voyons comment.

Daniel Bernoulli considère au sein d'une cohorte (au sens démographique de « population née dans une même année ») le développement d'une maladie qu'on ne peut contracter qu'une fois. La table de survie est représentée par $\xi(x)$ qui désigne le nombre de survivants au début de l'année x parmi lesquels $S(x)$ sont encore susceptibles de prendre la variole. Sous l'hypothèse qu'une personne sur n va prendre la maladie et une personne infectée sur m va en périr, Bernoulli décrit par une équation différentielle ⁽¹⁾ la trajectoire de $S(\cdot)$. Il en déduit une relation entre $S(x)$

et $\xi(x)$. Comme justement $\xi(x)$ est connu par les tables de survie, on peut donc calculer à tout âge x :

$$S(x) = \frac{m}{(m-1)e^{\frac{x}{n}} + 1} \xi(x)$$

Reste bien sûr à déterminer m et n . L'auteur écrit à leur propos : « je me suis contenté de les supposer constamment les mêmes, du moins jusqu'à l'âge d'environ vingt ans mais nous sommes encore libres sur le choix de ces valeurs absolues, c'est pourquoi il faut tâcher de les choisir telles qu'elles soient les plus convenables aux notions que nous avons sur la nature de la petite vérole, relativement à chaque climat » [Bernoulli, 1765, p. 13].

Le problème est donc que Bernoulli ne peut pas observer directement m et n , qui en toute généralité devraient s'écrire $m(x)$ et $n(x)$ et varier à chaque âge. Il propose ainsi de retenir $m = n = 8$ en constatant que cela aboutit à attribuer la treizième partie des morts à la variole, toutefois il n'explique aucune procédure d'estimation des paramètres. Le modèle est calibré uniquement sur la proportion totale des décès imputable à la variole : c'est assez pour dire que Bernoulli, qui décrit pourtant des différences dans la virulence du mal à Bâle ou à Paris, et indique donc qu'on pourrait supposer la susceptibilité à l'infection et la mortalité variant avec l'âge, ne s'intéresse pas à la modélisation pour elle-même.

En revanche, dès lors qu'il a compartimenté la population, il peut reconstruire une table de survie « de l'état non variolique » en appliquant un taux de mortalité différent aux susceptibles (qui souffrent le taux de mortalité naturelle de la table observée) et aux remis (dont la mortalité est diminuée de celle imputée à la variole), soit en fin de compte :

$$z(x) = \frac{me^{\frac{x}{n}}}{(m-1)e^{\frac{x}{n}} + 1} \xi(x)$$

Et l'auteur de commenter : « en prenant pour x qui marque l'âge, un nombre un peu grand, le rapport de $z(\cdot)$ à $\xi(\cdot)$ doit être extrêmement près de celui de m

à $m - 1$, ou de 8 à 7 pour notre hypothèse, sans cependant jamais l'atteindre exactement ». Voilà qui est simple, mais il propose ensuite une série de caractérisations pour établir la différence avec l'état naturel. Au bout du compte, il peut comparer l'espérance de vie à la naissance, de vingt-six ans et sept mois dans l'état naturel contre vingt-neuf ans et neuf mois pour ceux que l'inoculation protège. Mais surtout, Daniel Bernoulli montre que même si l'inoculation tuait assez d'enfants (un sur 9,43 en l'occurrence) pour rendre égales les espérances de vie dans l'état naturel et dans l'état non variolique, l'espérance de vie des inoculés serait supérieure à celle de l'état naturel à tous les âges. Après Mann et Whitney [1947], on dirait que la vie des inoculés domine stochastiquement l'état naturel, c'est-à-dire que $\forall x, I(x) \leq N(x)$ où $I(\cdot)$ et $N(\cdot)$ représentent les fonctions de répartition de l'âge au décès des inoculés et de l'état naturel (comme le montre la juxtaposition des deux courbes de la figure 1). Ce critère de décision est peut-être la contribution la plus importante du mémoire de Bernoulli, bien que les historiens des sciences comme Bacaër se soient plutôt intéressés aux équations différentielles.

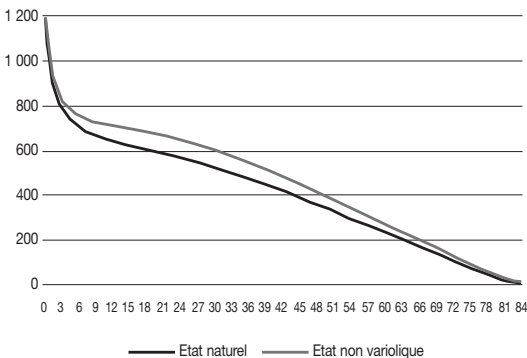
Il définit ce courant comme une « entreprise de quantification du social au service de l'action politique » : c'est bien ce que fait Bernoulli puisque, pour décider s'il est souhaitable de procéder à l'inoculation généralisée, il propose un modèle de la mortalité en l'absence de variole et un critère de décision pour comparer l'état naturel à cet état non variolique hypothétique. Ce faisant, Daniel Bernoulli invente la dynamique des populations susceptibles/infectées/remises de la maladie qui sera redécouverte un siècle et demi après sa mort. Mais entre-temps, aucune contribution notable n'étend le cadre analytique bernoullien, si ce n'est d'Alembert qui critique le bien-fondé des hypothèses et le critère de dominance [Rieucan, 2008].

La modélisation mathématique des épidémies après Bernoulli

Lorsque Ronald Ross [1916] propose une histoire de la modélisation mathématique des épidémies, les précurseurs qu'il cite, c'est-à-dire Farr [1866], Evans [1875] et Brownlee [1906] sont surtout remarquables par leur échec à offrir une théorie et une méthode convaincantes. Ils ont cherché à ajuster les données de l'épidémie de peste bovine de 1865 puis de variole de 1871 en partant de courbes discrètes du nombre de cas, mais ils ne parviennent pas à offrir l'équation analytique d'une population (susceptibles, infectés ou remis). Il est bien évident que s'ils avaient lu Bernoulli, ils auraient pu adapter sa méthode pour ajuster les données dont ils disposaient. Dans cette lignée d'auteurs britanniques qui témoigne depuis la fin du XIX^e siècle d'un intérêt continu pour les questions épidémiologiques aussi bien humaines que plus généralement animales, Hamer [1906] est le premier à retrouver explicitement la tripartition des susceptibles, des infectés et des remis, et à écrire le nombre d'infectés comme une proportion du nombre des susceptibles.

Ronald Ross a proposé de nouvelles instanciations du modèle compartimental à la Bernoulli. En 1911

Figure 1 - Courbes de survie de Bernoulli, 1760



Source : *Essai d'une nouvelle analyse de la mortalité causée par la petite vérole, & des avantages de l'inoculation pour la prévenir*, Daniel Bernoulli, 1765.

S'il fallait conclure sur la contribution de Daniel Bernoulli, ce serait avec Thierry Martin [2003] qui avait rassemblé dans un fort volume les contributions à *l'Arithmétique politique dans la France du XVIII^e siècle*.

d'abord, dans la deuxième édition de son ouvrage sur la prévention de la malaria, il offre un appendice sur « une théorie des événements » : deux équations différentielles représentent le nombre d'infectés chez les humains et les moustiques. Lotka [1923] a complètement explicité le modèle et les dynamiques des variables d'intérêt. On a surtout retenu de la contribution originale de Ross [1911] une double formulation d'un résultat pratique : d'une part il existe un seuil critique dans la population des moustiques dont le dépassement permet le développement de l'épidémie, d'autre part le taux de reproduction de la maladie, le fameux R_0 , est supérieur à 1 si le nombre de moustiques est supérieur au seuil critique. Tout cela conduit Ross à préconiser la destruction des moustiques pour lutter contre la maladie. Les contributions suivantes de Ross [1916], aidé par Hudson dans deux articles de 1917 offrent une généralisation de son modèle qui a été éclipsé par les travaux de Kermack et McKendrick.

Après un article fondateur en 1927, Kermack et McKendrick ont développé leur analyse dans quatre textes successifs. Le premier modèle est une reformulation du modèle épidémique de Ross [1911] en termes plus généraux : il s'agit donc de la diffusion d'une épidémie dans une population stationnaire, où les taux de passage (de S à I et de I à R) peuvent dépendre de l'âge des sujets – possibilité dont on a vu qu'elle avait été considérée mais pas effectivement modélisée par Bernoulli qui s'était contenté d'un taux d'infection et de rémission constant avec l'âge (ce qui correspond au modèle compartimental standard après Kermack et McCormick). Les auteurs formulent les conditions pour le développement de l'épidémie ($R_0 > 1$), décrivent la dynamique du nombre de cas d'infection et les modalités d'extinction de l'épidémie. Reste que leur modèle ne peut appréhender l'évolution endémique d'une maladie ni sa récurrence : c'est ce qui est fait dans deux articles de 1932 et 1933. On peut alors observer que Bernoulli avait d'emblée représenté une maladie endémique mais, comme on l'a déjà remarqué, sans s'intéresser à la dynamique épidémique elle-même. En revanche, les modèles de Kermack et McKendrick montrent comment une maladie devient une épidémie, disparaît ou au contraire

persiste, y compris lorsque la population cible évolue du fait de l'accroissement naturel et des migrations.

Bernoulli a donc, sans le savoir, désigné l'axe de développement des modèles épidémiologiques les plus courants jusqu'à ce jour, et ses successeurs ont permis de considérer les nuances qu'il ne pouvait pas explorer. Par exemple, le modèle que Ferguson et son équipe ont utilisé pour prédire les effets de l'épidémie de Covid-19 découpe la population en régions et classes d'âge – 45 cellules = 5 régions fois 9 classes d'âge pour Ferguson *et al.* [2020] –, ce qui permet d'affiner la description des dynamiques au prix d'une plus grande exigence en termes de calibrage des paramètres. Il n'est pas possible de décrire ici les modèles originaux qui se sont démarqués des hypothèses déterministes de Bernoulli – on renvoie par exemple à Choisy *et al.* [2007] –, en revanche on va s'attarder un instant sur la remise en cause du déterminisme, en particulier dans l'analyse des épidémies.

L'épidémiologie et la révolution probabiliste

Les années 1920, qui voient la floraison des théories mathématiques des épidémies, constituent aussi un tournant pour la physique. La conception laplacienne telle qu'elle s'exprime dans l'ouverture du *traité philosophique sur les probabilités* voulait que le mouvement « du plus léger atome » fût connu de « l'intelligence » qui aurait à la fois le modèle du monde et les données pour le mettre en œuvre (2). Le « principe d'incertitude » formulé par Heisenberg oblige les physiciens à s'accommoder de l'idée qu'il existe une incertitude irréductible, invisible à l'échelle macroscopique des corps, mais perceptible quand on regarde, précisément, ces plus légers atomes. Si la physique n'est plus le lieu d'un déterminisme « mécaniste », si elle tient les probabilités non plus pour la marque de notre ignorance, mais pour une propriété de la nature même, alors les disciplines qui avaient déjà dû s'en accommoder ne sont pas moins scientifiques. C'était le propos des deux

volumes édités par Lorenz Krüger [1987] et qui montraient notamment comment la statistique sociale, la physiologie expérimentale et la génétique avaient dès le XIX^e siècle conçu la causalité comme probabiliste. Reste que s'il est facile de définir la causalité déterministe (A est la cause de B si A est toujours suivi de B), Pearl [2000] a montré qu'une définition logiquement cohérente et opérationnellement satisfaisante de la causalité probabiliste était difficile à formuler. Étant donné la difficulté de sa définition, on se contentera d'une approximation : on dira ainsi que A cause B (au sens indéterministe ou probabiliste) si A précède toujours B et augmente sa probabilité d'occurrence.

Les médecins ont d'emblée des difficultés avec les modèles probabilistes. Carter [1985] montre que la médecine ayant dû attendre les années 1880 pour construire son modèle causal autour de l'idée que les micro-organismes sont les causes des maladies, certains médecins sont peu enclins à abandonner ce qui leur paraît être le socle de la scientificité de leur discipline. Parascandola [2011] a décrit la transition de cette conception mécaniste vers une conception probabiliste de la causalité chez les anglophones. Je n'ai pas trouvé pareil récit pour les francophones, mais les médecins français, qui revendiquent l'héritage cartésien assimilent parfois la scientificité au déterminisme mécaniste : cela semble être encore le cas, par exemple, de Lefebvre [1998] qui conclut à la convergence de l'*introduction à la médecine expérimentale* avec le *discours de la méthode*, au contraire des spécialistes de Descartes qui cherchent plutôt la contribution de ce dernier à la médecine dans les distances qu'il prend avec une méthode impossible à mettre en œuvre [Romano, 2002]. Et bien sûr, la médecine brille par son absence dans l'ouvrage de Krüger [1987].

Si l'Académie de médecine a pu éprouver quelque difficulté avec l'« indéterminisme » des modèles probabilistes, Parascandola [2011] montre que les médecins qui ont contribué aux premières enquêtes sur les facteurs de risque étaient en accord avec les représentants du nouveau paradigme : physiciens (comme Niels Bohr) ou statisticiens (de l'école de Ronald Fisher). Concrètement, la méthode retenue pour les enquêtes

sur les causes du cancer du poumon comme des maladies cardio-vasculaires [Giroux, 2011] est celle des tests d'hypothèses statistiques. Ironie de l'histoire, Ronald Fisher lui-même a écrit une série d'articles pour dénoncer la confusion entre corrélation et causalité. Stolley [1991] rappelle que les mauvaises langues ont pu attribuer l'opposition de Fisher à ses contrats de consultant auprès des tabagiers, ou à sa passion de grand fumeur, mais il considère aussi le bien-fondé de la critique. En effet, les tests ne manquent pas de poser de nombreux problèmes : de la pertinence de l'hypothèse testée (par exemple, relativement à la dose considérée) à la difficulté d'exclure une cause alternative, en passant par la nature même de la relation entre les variables testées (le test peut seulement montrer que l'indépendance est hautement improbable). On pourrait toutefois, avec Rothstein [2003], montrer l'évolution entre les méthodes de sélection des assureurs décès américains des années 1890 et les tests de l'épidémiologie des facteurs de risque un demi-siècle après. Les premiers veulent exclure les prospects à risque et se contentent d'une simple corrélation, les seconds engagent les patients à un traitement et ils doivent donc leur prouver le bien-fondé de leur démarche. Cette rhétorique a définitivement convaincu les médecins dans les années 1960. Les médecins seulement ? C'est l'occasion de nous demander quels sont les prérequis pour comprendre l'épidémiologie et quel est son lectorat potentiel.

Des attendus à la professionnalisation

Qui peut lire Bernoulli en 1760 ? Et qui peut reproduire les tests des enquêtes épidémiologiques des années 1940 ou 1950 ? De manière significative, Bernoulli (qui était aussi médecin) a communiqué son texte à l'Académie des sciences, et non à l'Académie de médecine. En effet, le modèle de Bernoulli repose, comme on l'a vu, sur une équation différentielle du type décrit par Newton qui caractérise la mécanique classique (dans un repère unidimensionnel). A la fin

du XVIII^e siècle, Sigrist [2013] estime à environ un millier le nombre de membres des académies des sciences en Europe pour une population de cent millions d'habitants : la densité de lecteurs serait de l'ordre d'un pour cent mille habitants. C'est le lectorat potentiel de l'article de Bernoulli. A l'époque de Ross [1911], qui est lui-même médecin, tous les étudiants en sciences apprennent les équations différentielles, à l'exception des étudiants en médecine : c'est la raison pour laquelle cet auteur publie principalement dans les *Proceedings of the Royal Society of London – Series A* (sciences mathématiques, physiques et de l'ingénieur). Comme environ 1 % d'une classe d'âge en Europe fait des études supérieures dont 20 % de scientifiques [Schofer et Meyer, 2005], on peut compter un à deux lecteurs par millier d'habitants. La statistique des tests est rapidement intégrée aux études scientifiques qui se banalisent, si bien que dès les années 1950 on peut considérer qu'environ 1 % des classes d'âge émergentes dans les pays développés sont capables de lire les modèles d'épidémiologie mathématique (modèles) ou des facteurs de risque (enquêtes sur les causes).

Et aujourd'hui ? Le programme de mathématiques complémentaires de terminale [Conseil supérieur des programmes, 2019] a été conçu pour permettre à l'élève de terminale de s'initier aux équations différentielles d'une part et à la statistique mathématique d'autre part. Beaucoup de professeurs de mathématiques de terminale ont choisi à la rentrée 2020 d'illustrer leurs cours de mathématiques complémentaires par des modèles épidémiologiques, qui offrent justement une occasion d'étudier une équation différentielle simple en dehors de la mécanique classique. Le fait est plus remarquable qu'il n'y paraît, car c'est la première fois en France que les futurs médecins (qui n'ont plus vocation à étudier les mathématiques de spécialité) vont « tous » recevoir une formation qui leur permettra de lire les recherches en épidémiologie. C'était déjà le cas aux Etats-Unis où les études médicales démarrent après l'obtention d'un diplôme scientifique. Reste que les médecins français vont désormais se trouver à égalité avec les élèves intéressés par les sciences sociales quantitatives en général. Ce devrait donc être

10 à 20 % d'une classe d'âge qui serait désormais capable de comprendre les modèles de l'épidémiologie. A quoi servent alors les épidémiologistes professionnels ? Et pourquoi la France a-t-elle autant souffert de l'épidémie de maladie à coronavirus en 2020 malgré l'excellence de ses bacheliers ?

Tableau - Proportion de la population en capacité de lire les recherches en épidémiologie, ordre de grandeur

Année	1800	1900	1950	2020
% de lecteurs potentiels de Bernoulli/Ferguson	1 pour 100 000 habitants	1 pour 1 000 habitants	1 pour 100 habitants	1 pour 10 habitants ?

Source : auteur.

Pour l'année 1800 il s'agit de stocks, à partir de 1900 il s'agit plutôt de flux.

L'utilité des épidémiologistes ne fait pas de doute quand on consulte les travaux de Ferguson *et al.* [2020] et Hoertel *et al.* [2020] dont l'actualité est encore brûlante. Le premier article met en œuvre un modèle à la Bernoulli cellulé pour prévoir la dynamique de l'infection : malgré l'incertitude sur les paramètres, le scénario le plus vraisemblable est une première vague dévastatrice en l'absence de mesures de confinement (500 000 morts au Royaume-Uni) ; et après confinement, en l'absence de dépistage/isolation, une seconde vague qui atteint son pic en décembre. C'est cet article qui a décidé Boris Johnson à enjoindre aux Britanniques de se confiner, même si les gouvernements européens avaient en général réagi plus tôt à la vue des versions préliminaires. Le second article analyse l'impact probable des stratégies de déconfinement en France. Les auteurs expliquent clairement que trois options sont possibles : test et isolement des présumés infectés, confinement sélectif des personnes vulnérables, et enfin absence de contrainte dans les relations sociales mais accompagnée ou non du port du masque. S'ils considèrent la première option comme irréaliste étant donné la difficulté de contraindre les cas contacts, les auteurs ont montré que le confinement sélectif des personnes vulnérables permettait de gagner du temps dans la recherche d'une solution. Bref, les épidémiologistes, parce qu'ils ont compris la dynamique des épidémies telle qu'elle

est décrite par les modèles et parce qu'ils ont l'expérience de la gestion des épidémies passées, peuvent proposer des stratégies et en quantifier les effets. Cette quantification est évidemment hypothétique, mais dans l'ensemble, les ordres de grandeur se sont cette fois avérés bons, et l'estimation de la temporalité des pics épidémiques a été plutôt remarquable.

La diffusion de ces travaux dans le grand public, c'est-à-dire celui qui n'a pas fait l'investissement de comprendre ce qu'est une équation différentielle, est à peu près nulle. Toutefois, l'épidémiologie n'est pas critiquée par le même grand public, probablement en raison même de son assimilation à la médecine. On pourrait s'étonner de la virulence des critiques contre l'économie quand elle utilise les mêmes méthodes : il suffit d'entendre la polémique sur le « choix entre économie et santé » [Fassin, 2020] pour comprendre l'origine du problème. L'économie désignant à la fois la formation des revenus et leur étude, ceux qui affirment l'importance des questions économiques sont accusés de faire le lit des intérêts économiques : leur langage, quel qu'il soit est qualifié de rhétorique « néolibérale ». Est-ce ainsi qu'il est pertinent de qualifier Acemoglu *et al.* [2020] lorsqu'ils s'intéressent à l'impact d'un confinement limité aux personnes vulnérables dans le cadre d'un modèle compartimental à la Bernoulli ? On pourrait penser que l'épidémie aurait eu le mérite de prouver la convergence des approches quantitatives en sciences sociales : cela n'est vrai que pour ceux qui savent lire.

On a reconnu dans l'épidémiologie deux grandes familles de modèles. L'épidémiologie mathématique vise à prévoir le développement dans le temps des épidémies avec des modèles de diffusion dans une population fondés sur l'étude des équations différentielles : elle hérite des travaux de Daniel Bernoulli, malgré une solution de continuité de presque 150 années. L'épidémiologie des facteurs de risque vise à établir les déterminants de la susceptibilité aux maladies et de leur impact, notamment en termes de mortalité ; elle s'appuie pour cela sur un « modèle » de causalité probabiliste qu'on trouve diffus dans l'arithmétique politique des Lumières mais que Laplace avait enterré. Cette

perspective historique conduit à constater que les médecins ne se sont approprié l'épidémiologie scientifique du XX^e siècle qu'après son développement. Elle permet aussi de rendre compte de la proximité entre les méthodes contemporaines des sciences sociales quantitatives et les projets qui les ont esquissées au siècle des Lumières. En la matière, il faut se garder d'assimilations hâtives car seule une lecture attentive, et informée de l'état des disciplines contemporaines permet de prendre la nature des progrès. De manière inattendue, l'incompréhension de l'épidémiologie par le public permet aussi d'interpréter la « crise » toujours remise en scène de la science économique : non seulement la science en question est manifestement plutôt un art du choix des modèles pertinents et des stratégies à évaluer, mais encore il n'y a pas de raison que ceux qui ne veulent pas comprendre les dynamiques épidémiques veuillent comprendre les questions économiques. Condorcet, qui pensait que l'éducation suffirait à dissiper les inégalités [Rieucan, 1997, pp. 288 sqq.], serait aujourd'hui déçu de constater le peu d'appétit de ses semblables pour la compréhension du monde qui les entoure...

Notes

1. Bien que les commentateurs modernes écrivent parfois deux équations, Bernoulli n'en écrit qu'une c'est-à-dire $-dS = \frac{Sdx}{\xi} - \frac{Sd\xi}{\xi} - \frac{SSdx}{m\xi}$ qu'il intègre par un changement de variable.

2. La phrase complète au troisième paragraphe de l'essai est : « Une intelligence qui, à un instant donné, connaîtrait toutes les forces dont la nature est animée et la situation respective des êtres qui la composent, si d'ailleurs elle était suffisamment vaste pour soumettre ces données à l'analyse, embrasserait dans la même formule les mouvements des plus grands corps de l'univers et ceux du plus léger atome ; rien ne serait incertain pour elle, et l'avenir, comme le passé, serait présent à ses yeux. »

Bibliographie

ACEMOGLU D. ; CHERNOZHUKOV V. ; WERNING I. ; WHINSTON M., "A Multi-Risk SIR Model with Optimally Targeted Lockdown", NBER Working papers, n° 27102, National Bureau of Economic Research, mai 2020.

- BACAËR N., *Histoires de mathématiques et de populations*, Cassini, coll. « Le sel et le fer », 2009.
- BACAËR N., *A Short History of Mathematical Population Dynamics*, Springer, 2011.
- BERNOULLI D., « Essai d'une nouvelle analyse de la mortalité causée par la petite vérole et des avantages de l'inoculation pour la prévenir », *Mémoires de mathématiques et de physique, Histoire de l'académie royale des sciences – année MDCCCLX*, 1765, pp. 1-45. Disponible sur gallica.bnf.fr
- BROWNLEE J., “Statistical Studies in Immunity: The Theory of an Epidemic”, *Proceedings Royal Society Edinburgh*, vol. 26, 1906, pp. 484-485.
- CARTER K. C., “Koch’s Postulates in Relation to the Work of Jacob Henle and Edwin Klebs”, *Medical history*, vol. 29, 1985, pp. 353-374.
- CHOISY M. ; GUÉGAN J.-F. ; ROHANI P., “Mathematical Modeling of Infectious Diseases Dynamics”, in *Encyclopedia of Infectious Diseases*, M. Tibayrenc (Ed.), 2006. doi:10.1002/9780470114209.ch22
- Conseil supérieur des programmes, « Mathématiques complémentaires – classe terminale, enseignement optionnel, voie générale », Bulletin officiel spécial n° 8 du 25 juillet 2019. Téléchargé de : <https://www.education.gouv.fr/bol19/Special8/MENE1921265A.htm>
- EVANS G. H., *Transactions Epidemiology Society*, 1874-1875, cité par Brownlee [1906].
- FASSIN E., « Généalogie d'une alternative néolibérale », *Libération*, 20 avril 2020.
- FARR W., “On the Cattle Plague”, *Journal of Social Sciences*, 5, 1866.
- FERGUSON N. et al., “Impact of Non-Pharmaceutical Interventions (NPIs) to Reduce Covid-19 Mortality and Healthcare Demand”, rapport n° 9, 16 mars 2020. Téléchargé de : <https://www.imperial.ac.uk/mrc-global-infectious-disease-analysis/covid-19/covid-19-reports/>
- GABRIEL J.-P. ; LA HARPE P. (DE), « Daniel Bernoulli, pionnier des modèles mathématiques en médecine », 2010. Téléchargé de : <https://images.math.cnrs.fr/Daniel-Bernoulli-pionnier-des-modeles-mathematiques-en-medecine.html>
- GIROUX E., « Contribution à l'histoire de l'épidémiologie des facteurs de risque », *Revue d'histoire des sciences*, tome 64-2, 2011, pp. 219-224. <https://doi.org/10.3917/rhs.642.0219>
- HAMER W. H., “Epidemic Disease in England”, Milroy Lectures, *Lancet*, tome I, 1906, pp 733-739.
- HOERTEL N. et al., “Lockdown Exit Strategies and Risk of a Second Epidemic Peak: a Stochastic Agent-Based Model of SARS-CoV-2 Epidemic in France”, MedRxiv, 5 mai 2020.
- KERMACK W. O. ; MCKENDRICK A., “A Contribution to the Mathematical Theory of Epidemics”, *Proceedings of the Royal Society of London. Series A*, vol. 115, 1927, pp. 700-721.
- KERMACK W. O. ; MCKENDRICK A., “Contributions to the Mathematical Theory of Epidemics. II. The Problem of Endemicity”, *Proceedings of the Royal Society of London. Series A*, vol. 138, 1932, pp. 55-83.
- KERMACK W. O. ; MCKENDRICK A., “Contributions to the Mathematical Theory of Epidemics. III. Further Studies of the Problem of Endemicity”, *Proceedings of the Royal Society of London. Series A*, vol. 141, 1933, pp. 94-122.
- KRÜGER L. ; GIGERENZER G. ; MORGAN M. S., *The Probabilistic Revolution*, 2 volumes, MIT Press, 1987.
- LEFEBVRE P., « Descartes et la médecine », *Chirurgie*, vol. 123, 1998, pp. 507-514.
- LOTKA A. J., “Contribution to the Analysis of Malaria Epidemiology”, *The American Journal of Hygiene*, vol. 3, 1923, pp. 1-121.
- MANN H. B ; WHITNEY D. R., “On a Test of whether one of two Random Variables is Stochastically Larger than the Other”, *Annals of Mathematical Statistics*, vol. 18, n° 1, 1947, pp. 50-60.
- MARTIN TH. (dir.), *Arithmétique politique dans la France du XVIII^e siècle*, Institut national d'études démographiques, PUF, 2003.
- PARASCANDOLA M., “The Epidemiologic Transition and Changing Concepts of Causation and Causal Inference”, *Revue d'histoire des sciences*, tome 64, n° 2, 2011, pp. 243-262. <https://doi.org/10.3917/rhs.642.0243>

- PEARL J., *Causality: Models, Reasoning, and Inference*, Cambridge University Press, 2020.
- RIEUCAU N., « Nature et diffusion du savoir dans la pensée économique de Condorcet », thèse Paris 8, 1997. Téléchargée de HAL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/tel-02351132/>
- RIEUCAU N., « Un éclairage inédit sur la contestation qui s'est élevée entre d'Alembert et D. Bernoulli au sujet de l'inoculation de la petite vérole », 2008, *Bolletino di storia delle scienze matematiche*, Anno XXVIII/2, 2008.
- ROMANO C., « Les trois médecines de Descartes », *Dix-septième siècle*, vol. 4, n° 217, 2002, pp. 675-696. <https://doi.org/10.3917/dss.024.0675>
- ROSS R., "A Special Addition on the Theory of Happenings", in *The Prevention of Malaria*, Londres, John Murray, deuxième édition, 1911.
- ROSS R., "An Application of the Theory of Probabilities to the Study of *a priori* Pathometry". Part I. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A*, vol. 92, 1916, pp. 204-230.
- ROTHSTEIN W., *Public Health and the Risk Factor: A History of an Uneven Medical Revolution*, Rochester, University of Rochester Press, 2003.
- SCHOFER E. ; MEYER J. M., "The Worldwide Expansion of Higher Education in the Twentieth Century", *American Sociological Review*, vol. 70, 2005, pp. 898-920.
- SIGRIST R., « Les communautés savantes européennes à la fin du siècle des Lumières », *Mappemonde*, n° 110, 2013, Téléchargé de : <http://mappemonde-archivage.mgm.fr/num38/articles/art13204.html>
- STOLLEY P. D., "When Genius Errs: RA Fisher and the Lung Cancer Controversy", *American Journal of Epidemiology*, vol. 133, n° 5, 1991, pp. 416-425. [doi:10.1093/oxfordjournals.aje.a115904](https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.aje.a115904). PMID 2000852

R E V U E D'ÉCONOMIE FINANCIÈRE

COMITÉ DE RÉDACTION

Présidents d'honneur

Jacques Delmas-Marsalet

Hélène Ploix

**

Thierry Walrafen, *Directeur de la publication*

Olivier Pastré, *Conseiller scientifique*

Xavier Mahieux, *Responsable éditorial*

Patrick Artus, *Directeur de la recherche et des études, Natixis*

Raphaëlle Bellando, *Professeur, Université d'Orléans*

Christian de Boissieu, *Professeur, Université Paris I*

Jean Boissinot, *Conseiller des gouverneurs, Banque de France*

Pierre Bollon, *Délégué général, Association française de la gestion financière*

Arnaud de Bresson, *Délégué général, Paris Europlace*

Jean-Bernard Chatelain, *Professeur, Université Paris I, GdRE « Monnaie Banque et Finance »*

Jézabel Couppey-Soubeyran, *Maître de conférences, Université Paris I Panthéon Sorbonne*

Claude Diebolt, *Directeur de recherche au CNRS, Université de Strasbourg*

Jean-Louis Fort, *Avocat à la Cour*

Stéphane Gallon, *Directeur de la division études, stratégie et risques, AMF*

Olivier Garnier, *Directeur général des statistiques, des études et de l'international, Banque de France*

Ulrich Hege, *Professeur, Toulouse School of Economics (TSE)*

Pierre Jaillet, *Chercheur associé, IRIS*

Fatos Koc, *Responsable de la gestion de la dette publique, OCDE*

Frédéric Lobe, *Professeur, Université de Lille II, SKEMA*

Catherine Lubochinsky, *Professeur, Université Paris II – Assas*

Sylvie Mathérat, *Groupe de haut niveau de la Commission européenne sur l'Union des marchés de capitaux*

Jean-Paul Pollin, *Professeur, Université d'Orléans*

Philippe Trainar, *Professeur, Conservatoire national des arts et métiers (CNAM)*

Natacha Valla, *Directrice générale adjointe de la politique monétaire, Banque centrale européenne*

38, rue de Ponthieu – 75008 Paris

Tél. : 01 73 44 03 20

Courriel : REF@aef.asso.fr

Site Internet : www.aef.asso.fr

L'économie, la finance et l'assurance après la Covid-19

Avant-propos

Les institutions financières françaises face à la crise de la Covid-19

FRANÇOIS VILLEROY DE GALHAU

Introduction

SYLVAIN DE FORGES, OLIVIER PASTRÉ

Retour sur l'histoire et perspectives

Histoire des modèles pandémiques

PIERRE-CHARLES PRADIER

Assurance et crises pandémiques

PIERRE MARTIN

L'économie de la peste dans les villes du XVII^e siècle

PIERRE DOCKÈS

La Covid-19, une chance pour l'Europe ?

PERVENCHE BERÈS

Crise de la Covid-19 : la place de l'assurance

dans le monde d'après

FLORENCE LUSTMAN

Renouveler la gestion de crise

STANLEY MCCHRYSAL

Les entreprises face à la Covid-19

Assurer l'avenir dans un monde incertain

THOMAS BUBERL

La capacité de réaction des banques dans la crise

de la Covid-19

LORENZO BINI SMAGHI

La gestion ESG, une solution à la crise de la Covid-19 ?

JEAN-JACQUES BARBERIS, MARIE BRIÈRE, SIMON JANIN

Quelques enseignements de l'impact de la Covid-19

sur le secteur de l'assurance

MARIE-DOHA BESANCENOT, CORINNE CIPÌÈRE

L'hôpital public face à la crise de la Covid-19

MIREILLE FAUGÈRE

L'économie face à la Covid-19

Pour une solution assurantielle aux catastrophes exceptionnelles

FLORENCE LUSTMAN

L'action des assureurs dans la crise de la Covid-19

PATRICK DIXNEUF

Cinq leçons sur l'avenir de l'assurance santé

après la Covid-19

ANDRÉ RENAUDIN

La résilience du secteur de l'assurance dans la crise de la Covid-19

JÉRÔME JEAN HAEGELI, PATRICK SANER

Le rôle des assureurs crédit dans la crise de la Covid-19

WILFRIED VERSTRAETE

Covid-19 : les banques françaises au service de l'économie

MAYA ATIG

La gestion d'actifs, mobilisation de l'épargne face à la crise de la Covid-19

PIERRE BOLLON, THOMAS VALLI

Le *private equity* face à la crise de la Covid-19

MONIQUE COHEN

De l'intervention publique dans la crise de la Covid-19

DOUGLAS J. ELLIOTT

La pandémie de Covid-19 reflète et aggrave les failles du néolibéralisme

JEAN-PAUL POLLIN

Les dépenses sociales dans la crise de la Covid-19

FRANÇOIS ECALLE

Macroéconomie et défi climatique

Les défis exceptionnels posés par la crise de la Covid-19

CHRISTIAN DE BOISSIEU

La crise de la Covid-19 dans les pays en développement : quelles conséquences et quelles perspectives ?

REMY RIOUX, ALEXIS BONNEL, HÉLÈNE DJOUFELKIT,

CÉCILE VALADIER

Géopolitique de l'énergie et crise de la Covid-19

PATRICE GEOFFRON, JEAN-MARIE CHEVALIER

Cassandra, le climat et la Covid-19

SYLVIE GOULARD

Le développement durable après la crise de la Covid-19

BERTRAND BADRÉ

Crise de la Covid-19, le retour des reliques barbares

PHILIPPE CHALMIN

Covid-19, la BEI accélère sa transformation

en banque européenne du climat

AMBROISE FAYOLLE

Politiques macroéconomiques

Endettement des États et crise de la Covid-19

EMMANUEL MOULIN

Endettement des entreprises françaises et crise

de la Covid-19

ROBERT OPHÈLE

L'Europe de la finance dans la crise de la Covid-19

OLIVIER GUERSENT

La réglementation financière peut-elle contrer la crise de la Covid-19 ?

KLAAS KNOT

Les banques centrales pendant et après la pandémie de Covid-19

BENOÎT CCEURÉ

Les innovations des banques centrales dans la crise de la Covid-19

MICHEL AGLIETTA, SABRINA KHANNICHE

La crise de la Covid-19 va-t-elle entraîner un retour de l'inflation ?

PATRICK ARTUS

La pandémie de Covid-19 accélère l'obsolescence des normes comptables

BERTRAND JACQUILLAT

Conclusion

JEAN-HERVÉ LORENZI, PHILIPPE TRAINAR

Chronique d'histoire financière

Fermetures d'écoles, épidémies et niveau de scolarité : une perspective historique basée sur l'épidémie

de poliomyélite en 1916 aux États-Unis

KEITH MEYERS, MELISSA A. THOMASSON

ISBN 978-2-37647-048-9

ISSN 0987-3368

Prix : 50,00 €



9 782376 470489