



HAL
open science

L'épidémiologie computationnelle à l'ère de la COVID-19: enjeux disciplinaires et politiques d'une spécialité fondée sur l'étude des réseaux

Fabrizio Li Vigni

► **To cite this version:**

Fabrizio Li Vigni. L'épidémiologie computationnelle à l'ère de la COVID-19: enjeux disciplinaires et politiques d'une spécialité fondée sur l'étude des réseaux. Réseaux: communication, technologie, société, 2021, 2021/4 (228), pp.23-60. 10.3917/res.228.0023 . halshs-03648760

HAL Id: halshs-03648760

<https://shs.hal.science/halshs-03648760>

Submitted on 21 Apr 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

L'épidémiologie computationnelle à l'ère de la COVID-19 : enjeux disciplinaires et politiques d'une spécialité fondée sur l'étude des réseaux

Fabrizio Li Vigni

Enseignant-chercheur contractuel à Sciences Po Saint-Germain-en-Laye. 5 rue Pasteur, 78100 Saint-Germain-en-Laye, France

Chercheur associé au Laboratoire Interdisciplinaire Sciences Innovations Sociétés – Université Gustave Eiffel, ESIEE Paris, CNRS, INRAE. 2 allée Jean Renoir, 93160 Noisy-le-Grand, France et au Groupe de Sociologie Pragmatique et Réflexive, EHESS. 105 boulevard Raspail, 75006 Paris, France

livignifabrizio@gmail.com

Résumé

La COVID-19 a propulsé sur le devant de la scène des spécialistes des réseaux ayant fait de la modélisation épidémiologique leur occupation principale. Deux questions se posent ici à propos de cette spécialité : d'une part, comment sont construits les modèles et que recouvre leur irruption dans le débat ces derniers mois ; et d'autre part, comment des physiciens et des mathématiciens ont-ils réussi à devenir des experts épidémiologistes sans un parcours de professionnels de santé ? Nous abordons ces questions en étudiant les modèles produits par cette spécialité, ainsi que le processus de son émergence et la division du travail en son sein. La dernière section de l'analyse revient sur la première vague de l'épidémie et sur les débats qu'elle a pu renforcer ou ouvrir par rapport à cette nouvelle spécialité. L'article se fonde sur une enquête de terrain menée dans quatre laboratoires d'épidémiologie computationnelle, basés à Paris, Turin, Boston et Los Alamos.

Mots-clés

Simulation par ordinateur, réseaux, spécialité, santé publique, santé globale, COVID-19.

Depuis le début des années 2000, le monde a été frappé, avec une fréquence croissante, par des épidémies zoonotiques d'intensité variable. Dans le même temps, une nouvelle communauté de scientifiques européens et américains¹ s'est constituée, qui tire d'une connaissance physicienne, mathématique et computationnelle des réseaux complexes un ensemble d'outils d'analyse et de prédiction des épidémies. Cette communauté se revendique d'une nouvelle spécialité, l'«épidémiologie computationnelle», et offre son expertise scientifique aux pouvoirs publics afin d'évaluer, grâce à des modèles numériques simulant l'évolution des épidémies, à la fois les risques de contagion, les populations vulnérables et l'effet des mesures d'intervention pour endiguer la propagation (Marathé et Vullikanti, 2013). Parfois mise en avant, parfois contestée, en général mal comprise, cette spécialité a été très médiatisée pendant la crise de la COVID-19 et fait désormais partie de l'appareillage de préparation sanitaire dans nombre d'États. Bien qu'il existe maints travaux de sciences sociales sur l'histoire et la sociologie de l'épidémiologie (Krieger, 2011 ; Amsterdamska, 2005 ; Keck, 2010) et de la théorie des réseaux (Freeman, 2004 ; Watts, 2004 ; Letonturier, 2012), la spécialité qui fait l'objet de cet article reste un territoire presque inexploré – exception faite pour quelques travaux philosophiques (Grüne-Yanoff, 2011 ; Opitz, 2017).

Cet article se propose de fournir une vision panoramique de ce territoire inconnu des sciences sociales, qui mérite d'autant plus d'attention après l'essor de la COVID-19, à la lumière du rôle que les modélisateurs ont joué dans la prise de décision des gouvernements pendant la crise. Pour présenter cette vision d'ensemble, nous partirons de deux questions.

La première s'inscrit dans les *simulation studies* et la sociologie de la modélisation numérique en particulier (Dahan, 2007 ; Varenne et Silberstein, 2013 ; Aykut, Demortain *et al.*, 2019) : comment sont construits les modèles épidémiologiques numériques, et que recouvre leur irruption ces derniers mois dans le débat public, où ils ont été âprement critiqués par certains virologues et médecins ? Ces modèles ont notamment été mobilisés comme justifications à des décisions politiques radicales comme le confinement, la fermeture des frontières nationales ou la surveillance des déplacements citoyens. La première section de l'article présente ainsi les caractéristiques

¹ Malgré la présence de quelques femmes au sein de cette communauté scientifique, ses tenants demeurent majoritairement des hommes.

principales des modèles épidémiologiques. On s'intéressera en outre au travail que les épidémiologistes computationnels mènent à la frontière entre plusieurs disciplines : quels savoirs prennent-ils en compte et comment les articulent-ils ?

La deuxième question prend appui sur l'intersection entre la sociologie des disciplines scientifiques (Gingras, 1991 ; Dubois, 2013) et la sociologie du travail scientifique (Dahan et Guillemot, 2006 ; Evetts, Mieg *et al.*, 2006) pour décrire les pratiques des épidémiologistes computationnels. Comment ces spécialistes des réseaux ont-ils réussi à devenir des experts d'épidémies vis-à-vis des décideurs politiques, sans afficher un parcours classique de médecins ou de professionnels de la santé publique ? Les sections 2 et 3 de l'article retracent respectivement les parcours des épidémiologistes computationnels et leurs stratégies de légitimation, et la division du travail à l'œuvre au sein de leurs équipes. Nous verrons que leur parcours interdisciplinaire les amène à étudier les épidémies en les considérant comme un objet d'enquête comme un autre, et que leur intégration dans des institutions médicales se révèle fondamentale pour acquérir une crédibilité politique.

Inscrit dans la sociologie pragmatique et les *science studies* (Chateauraynaud et Debaz, 2018 ; Pestre, 2006), cet article repose sur un matériau, antécédent à l'essor de la COVID-19, de vingt et un entretiens semi-directifs de deux heures en moyenne, réalisés entre 2015 et 2017. Ces entretiens ont été conduits avec dix épidémiologistes computationnels, deux designers et un chef de projet basées à Los Alamos, Boston, Paris et Turin, ainsi qu'avec un médecin et un épidémiologiste issus des instituts de santé publique italien (Institut Supérieur de la Santé ou ISS) et français (Santé publique France ou SpF). Lorsqu'il s'agit d'épidémiologistes computationnels à temps plein ou d'agents de santé, seul le sigle de leur institution et la date de l'entretien sont indiqués. Dans le cas des autres figures professionnelles, on cite également leur rôle à l'intérieur des laboratoires. La plupart des entretiens ont été effectués lors des visites dans les quatre structures suivantes :

- *Epidemics in complex environments* (EPIcx), laboratoire fondé à Paris en 2011 faisant partie de l'équipe « Maladies transmissibles : Surveillance et modélisation » de l'UMR Institut Pierre Louis d'Épidémiologie et de Santé Publique (Inserm, Sorbonne) ;

- *Mathematical and Computational Epidemiology* (MCEpi) est une équipe de recherche informelle fondée en 2014 à Los Alamos qui réunit des chercheurs appartenant à différentes divisions du Los Alamos National Laboratory (LANL) ;
- *Modeling of Biological + Socio-technical Systems* (MoBS), qui fait partie d'un consortium de laboratoires au sein du Network Science Institute (NETSI), qui a été fondé en 2015 au sein de la Northeastern University, Boston ;
- *Institute for Scientific Interchange* (ISI), centre de recherche privé fondé en 1983 à Turin avec une focale sur l'interdisciplinarité ; depuis le début des années 2000, l'épidémiologie computationnelle y bénéficie d'une attention particulière.

À cela s'ajoute l'observation d'un congrès intitulé *Complex Networks. From Theory to Interdisciplinary Applications*, qui s'est tenu au Palais du Pharo à Marseille du 11 au 13 juillet 2016. Rencontre « satellite » de la conférence annuelle de physiciens statisticiens *Statphys26*, il a été l'occasion de connaître la communauté, de prendre des contacts pour les visites de laboratoire et de réaliser un certain nombre d'entretiens en marge de l'évènement.

LES MODÈLES ÉPIDÉMIOLOGIQUES EN DÉBAT

Si les modèles mathématiques d'épidémies existent depuis les années 1920 (Hethcote, 2000), le terme d'« épidémiologie computationnelle » fut utilisé pour la première fois en 1988 en référence à des méthodes de simulation basées sur la science des systèmes, mais, à en juger au nombre de citations quasi-inexistantes, il n'eut pas de suite (Habtemariam, Ghartey-Tagoe *et al.*, 1988). Le terme est réapparu au début des années 2000 sur l'initiative d'un petit groupe de chercheurs issus d'une poignée de pays occidentaux, spécialisés en physique statistique et en théorie des réseaux. On compte aujourd'hui une vingtaine d'équipes dans les pays du Nord. Ces équipes se connaissent et collaborent de manière ponctuelle dans plusieurs cadres : projets de recherche, activités de conseil, publications, lobbying, etc.

Une démarche interdisciplinaire centrée sur l'étude des réseaux

Les fondateurs et principaux porteurs de l'épidémiologie computationnelle ont en commun non seulement le fait de maîtriser des capacités mathématiques et informatiques poussées, mais aussi et surtout de partager une certaine connaissance de la physique statistique. C'est de cette spécialité qu'ils tirent une partie de leurs outils d'analyse et de prévision. C'est de la traduction et de la réinterprétation de l'épidémiologie dans les termes de cette spécialité que naît le cœur de métier de l'épidémiologiste computationnel.

La physique statistique est une branche de la physique théorique développée par Josiah Willard Gibbs dans la deuxième moitié du XIX^{ème} siècle, qui analyse, à l'aide de la théorie des probabilités, le comportement macroscopique des systèmes composés de nombreux éléments en interaction (atomes, molécules, etc.). La théorie des réseaux, qui bénéficie d'ancrages pluriels, est un domaine apparenté étudiant, quant à elle, les systèmes pouvant être décrits de façon réticulaire : des « nœuds » (individus, villes, etc.) sont connectés entre eux par des « arêtes » (par exemple, un contact physique pouvant donner lieu à une contagion). On cherche alors à déterminer les effets d'architecture globale du réseau (propriété « petit monde »², effet « on ne donne qu'aux riches »³, transition de phase⁴, etc.) (Newman, Strogatz *et al.*, 2001). Ainsi, depuis la deuxième moitié des années 1990, ont commencé à être analysés, suivant cette perspective, marchés financiers, villes, réseaux de gènes, écosystèmes, etc. Les épidémies se sont ajoutées à la liste dès le début des années 2000. Et certains des chercheurs qui ont commencé à les étudier régulièrement ont décidé de devenir des épidémiologistes à temps plein.

Pour ce faire, ils ont dû passer par la lecture de manuels et d'articles d'épidémiologie, et par le dialogue avec les professionnels de la santé publique. Ces chercheurs puisent ensuite leurs savoirs opérationnels à la fois

² Aussi appelé « paradoxe de Milgram », mais plus connu sous le nom de « six degrés de séparation », ce phénomène indique que, dans un réseau, chaque nœud peut être relié à n'importe quel autre nœud à travers une courte chaîne de relations.

³ L'expression est une métaphore du « principe de Pareto », aussi appelé loi des 80-20. Il s'agit d'un phénomène observé dans beaucoup de réseaux qui fait que, lorsqu'un réseau se constitue ou s'étend, les nœuds qui attirent déjà beaucoup de liens ont tendance à en attirer davantage.

⁴ Identifiable par une valeur ou un *range* de valeurs, la transition de phase désigne le point de bascule capable de transformer l'état d'un système dans un autre (*e.g.* de liquide à gazeux).

dans la physique, l'informatique, les mathématiques, l'écologie et la géographie. L'infection est ainsi modélisée par des logiciels représentant des réseaux analysés par le biais d'outils mathématiques issus de la physique statistique. C'est en traitant la dynamique d'une épidémie comme un système fait de nœuds et d'arêtes que les épidémiologistes computationnels peuvent, par exemple, traduire le concept de « seuil épidémique » – à savoir l'incidence (ou nombre de nouveaux cas) d'une maladie à partir de laquelle on peut considérer qu'un processus épidémique est en cours – dans celui de « seuil de transition de phase ». Comme le dit l'un des fondateurs du domaine, il s'agit, pour lui et ses collègues, de mobiliser des savoirs liés à leur carrière scientifique antérieure afin d'appréhender de manière innovante l'étude des épidémies (MoBS, 11.07.16). Ce même chercheur donne un autre exemple de traduction d'un phénomène épidémique en langage physique :

« le truc que nous avons fait pour résoudre le problème de la séparation entre les échelles temporelles dans la diffusion des épidémies est l'équivalent de l'approximation de Born-Oppenheimer⁵ en physique moléculaire, ce qui a été possible en nous basant sur l'analogie entre les deux phénomènes » (*ibid.*).

L'informatique fournit les modèles à base d'agent (MBA) et les systèmes multi-agents (SMA)⁶ pour produire des anticipations fines – fermer les écoles ici à tel moment, administrer le vaccin à une tranche d'âge donnée durant une phase précise de l'épidémie, etc. – mais géographiquement limitées (Luke et Stamatakis, 2012). Les mathématiques fournissent, entre autres, les équations différentielles pour étudier la dynamique des systèmes. Les savoirs épidémiologiques sont mobilisés pour nommer et interpréter les variables, caractériser les équations et borner la dynamique du phénomène modélisé, à travers notamment la traduction des modèles classiques de diffusion épidémique tel SEIR (susceptible, exposé, infecté, rétabli). L'écologie fournit l'approche par métapopulations, laquelle, contrairement aux MBA et SMA qui simulent les agents un à un, se fonde sur des clusters

⁵ Équation qui décrit la séparation ou découplage, à l'intérieur de l'atome, entre le mouvement nucléaire et le mouvement des électrons. Elle constitue la première étape dans la simplification de l'équation de Schrödinger, qui décrit l'évolution d'une particule quantique dans le temps.

⁶ Des logiciels de simulation composés de nombreux agents en interaction, qui évoluent dans un environnement préconfiguré par le codeur selon des règles simples et une série de variables.

d'individus distribués sur un territoire et permet de modéliser toute la planète (Ajelli, Gonçalves *et al.*, 2010). Enfin, la géographie quantitative fournit des modèles théoriques pour modéliser les déplacements des agents dans l'espace, en particulier les mouvements pendulaires interprétés par des « modèles gravitaires », présupposant que les déplacements tendent toujours vers le centre urbain voisin le plus grand (Pumain et Saint Julien, 1989). Ce type d'interdisciplinarité s'appuie sur des « zones de transaction » entre spécialistes des réseaux et professionnels de santé (voir section 2 et 3), mais aussi sur le travail de « traduction » que les premiers font sur des outils issus de la physique, de l'écologie et de la géographie quantitative pour les adapter au langage et aux objets de l'épidémiologie (Li Vigni, 2021b).

Bien qu'aujourd'hui ces chercheurs jouissent d'un plus grand crédit auprès de nombreux spécialistes en santé publique, leurs approches computationnelles continuent de susciter des levées de bouclier chez certains professionnels de santé qui n'hésitent pas à les qualifier de « *spéculations théoriques* »⁷.

Cultures épistémiques et dimension normative des modèles

Il n'est pas anodin que l'alerte quant à la dangerosité de la COVID-19 nous soit d'abord venue d'épidémiologistes, quand les chercheurs se voulant rassurants, jusqu'à la fin février 2020, étaient essentiellement des infectiologues. Comme l'a déjà souligné Keck (2020), les différentes disciplines médicales peuvent mettre en jeu des façons totalement différentes d'envisager ce qui peut sembler, à première vue, comme un seul et même objet d'étude. Les virologues s'intéressent au virus comme entité individuelle, qu'ils suivent à la trace et par le biais du microscope, en l'examinant dans son rapport avec les espèces vectrices. À une échelle méso, les infectiologues se focalisent sur l'organisme infecté dans son ensemble, en adressant aux patients de multiples analyses biomédicales. Enfin, les épidémiologistes développent des savoirs populationnels, à différentes échelles géographiques, à l'aide d'enquêtes statistiques ou de modèles mathématiques, pour étudier comment l'infection se diffuse ou non. Il existe donc différentes « *cultures épistémiques* » au sein de l'arène médicale, chacune ayant ses protocoles méthodologiques, ses principes

⁷ <https://www.nouvelobs.com/coronavirus-de-wuhan/20200403.OBS26990/en-cas-de-freinage-estival-de-l-epidemie-le-confinement-pourra-etre-largement-leve.html>.

épistémologiques, ses ontologies, ses valeurs et ses pratiques d'interfaçage avec le politique (Knorr-Cetina, 1999). C'est en raison de cela que les différents spécialistes ont produit des appréciations divergentes de l'épidémie et de son évolution. Si, du fait des taux de guérison, aux yeux de certains professionnels de santé, ce virus a pu initialement ne pas sembler très menaçant, les modèles produits par les épidémiologistes computationnels ont, au contraire, très tôt avancé le fait qu'un taux important de personnes vectrices étaient probablement non repérées dans les statistiques, faisant craindre à l'échelle des sociétés un risque de dissémination important.

Pour répondre aux questions que les gouvernements se posent en cas d'épidémie, les modélisateurs produisent plusieurs scénarios (si X, alors Y), activité préliminaire et distincte du *forecasting* qui est une tentative de prédire ce qui va arriver. Lorsqu'on ne connaît pas la force de frappe de la maladie, les chercheurs testent plusieurs cas de figure (incidence faible, moyenne ou forte), ce qui permet d'envisager différentes stratégies d'intervention (vaccination ciblée, aléatoire ou générale, confinement, etc.). En simplifiant la réalité à un nombre limité d'hypothèses, un modèle est conçu pour répondre à certaines questions, et pas à d'autres. Or comme l'écrivent Lascoumes et Le Galès (2004, p. 29), « *les instruments à l'œuvre ne sont pas des dispositifs neutres, ils produisent des effets spécifiques indépendants des objectifs poursuivis et qui structurent, selon leur logique propre, l'action publique* ». Autrement dit, les modèles sont porteurs, intrinsèquement, d'une dimension normative (Vieille-Blanchard, 2007 ; Benbouzid, 2018 ; Li Vigni, 2020). Intégrer une hypothèse dans un modèle revient à la faire exister comme décision politique concevable. À l'inverse, l'écarter (pour sa difficulté calculatoire, pour des questions idéologiques, ou parce qu'on la juge pratiquement ou politiquement irréalisable) revient à en rendre l'acceptation plus difficile. En comparant dans leur modèle les conséquences sanitaires probables d'une stratégie classique de freinage des épidémies, avec un confinement général de la population pourtant encore largement jugé impensable en Europe au début de 2020, l'équipe britannique de l'Imperial College de Londres a par exemple permis à l'hypothèse du « *lockdown* » d'exister dans l'espace des positions politiques envisageables⁸. De même, suivre le principe de précaution peut conduire à un confinement strict et indéfini, quitte à augmenter la dépense étatique en matière de

⁸ <https://www.imperial.ac.uk/mrc-global-infectious-disease-analysis/covid-19/report-9-impact-of-npis-on-covid-19/>.

protection sociale, tandis que le cadre de l'analyse coûts-bénéfices peut amener à un déconfinement rapide en tablant sur l'immunité de groupe.

UNE SPÉCIALITÉ FONDÉE PAR DES EXPERTS DES RÉSEAUX

L'épidémiologie est une discipline intimement liée au politique, ayant une longue histoire (Krieger, 2011) et se divisant en plusieurs branches (Ahrens et Pigeot, 2014). Elle s'est reconfigurée de nombreuses fois depuis son apparition (Amsterdamska, 2005). Si l'essor de la bactériologie entre 1890 et la Première Guerre mondiale ne posa aucun problème aux épidémiologistes de l'époque qui l'intégrèrent aussitôt dans leur palette d'outils, l'émergence de la biométrie et des nouvelles techniques statistiques dans la première moitié du XX^{ème} « *les laissa souvent désorientés* » (*ibid.*, p. 26). Après la Deuxième Guerre, les manuels d'épidémiologie considéraient désormais les statistiques comme étant la spécificité principale de la discipline. En parallèle, si les premiers modèles mathématiques pour décrire les épidémies apparurent dès le début du XX^{ème}, c'est à partir des années 1950 qu'ils connurent une forte expansion. L'essor de l'épidémiologie computationnelle marque un nouveau moment dans cette histoire. Fondée dans les années 2000 par un petit nombre de physiciens-statisticiens (Pastor-Satorras et Vespignani, 2001), elle vise à étendre les modèles mathématiques par la théorie des réseaux et l'informatique, et ambitionne de constituer une infrastructure internationale pour la prédiction des dynamiques infectieuses sur le modèle des prévisions météorologiques (Moran, Fairchild *et al.*, 2016).

Un parcours interdisciplinaire

Depuis une trentaine d'années, du fait de la réduction des postes dans différents domaines de la physique théorique, de nombreux physiciens se sont tournés vers les sciences de la vie et les sciences sociales (Gingras et Schinckus, 2012, p. 120). C'est notamment le cas des physiciens statisticiens, très actifs dans des journaux interdisciplinaires comme *Physical Review E* ou *Physica A*. Pour justifier leur migration disciplinaire et la généralisation de leurs outils à des objets inédits, ils expliquent que de nombreux systèmes naturels et humains, à partir du moment où ils peuvent être ramenés « *à leur description minimale* » en nœuds et arêtes, sont des réseaux, qui partagent les mêmes caractéristiques structurelles

d'organisation et qui peuvent être étudiés par la même boîte à outils théorique (Bersini, 2005, p. XVIII-XIX). Comme le dit l'un des fondateurs de l'épidémiologie computationnelle :

« Si tu regardes tous ces phénomènes [épidémiologiques] avec le prisme du système complexe, et que tu réussis à faire abstraction des détails, tu t'aperçois que la diffusion d'une maladie se comporte comme un système de réaction-diffusion⁹ » (MoBS, 11.07.16).

La plupart des épidémiologistes computationnels partagent le même type de carrière, avec un début disciplinaire, une phase de transition interdisciplinaire et un atterrissage de spécialisation. Nos interviewés proviennent de la physique, des mathématiques, de l'informatique, des statistiques et de la biologie, tous ayant des compétences de modélisation informatique. L'un de nos enquêtés affirme avoir « *en quelque sorte changé de profession trois fois* », ayant commencé avec une thèse en physique théorique des états condensés de la matière et ayant continué avec l'étude des virus informatiques (*ibid.*). C'est en tant que spécialiste des réseaux qu'il finit, en troisième lieu, par étudier la diffusion des épidémies à partir d'une base de données de l'International Air Transport Association sur le transport aérien obtenue « *pour des raisons [...] assez aléatoires* » peu après l'épidémie de SRAS. Pour ce chercheur comme pour d'autres, les épidémies n'étaient au début qu'un objet réticulaire parmi d'autres. Au tournant des années 2010, ce physicien acquiert la possibilité de se dédier à temps plein à l'épidémiologie computationnelle, notamment lorsque la Northeastern University de Boston lui offre une chaire de « *physique, réseaux et santé publique* ». C'est à l'aide d'un entrepreneur philanthrope, comme cela se produit souvent aux États-Unis, qu'il parvient à monter le MoBS, section du *Network Science Institute*, et à attirer ainsi une dizaine de chercheurs (confirmés et juniors), afin de développer plusieurs outils informatiques de modélisation épidémiologique. Entre 2005 et le début des années 2010, ce même chercheur est à l'origine de la constitution, au sein de l'ISI de Turin, d'un pool de physiciens statisticiens spécialisés dans l'étude des épidémies. Une série de financements par projet issus de la Commission Européenne ayant pour but d'étudier des systèmes complexes ou bien des épidémies en

⁹ Le phénomène de réaction-diffusion est saisi par des équations décrivant la diffusion de la matière dans l'espace à partir d'une série de réactions qui transforment localement les différentes substances chimiques en jeu.

cours à ce moment-là leur a permis d'acquérir des fonds opérationnels, des compétences et de la visibilité. Grâce à une *starting grant* issue du *European Research Council*, l'une de ses ex-postdoctorantes – aujourd'hui au milieu de la trentaine et représentante de la deuxième génération d'épidémiologistes computationnels – est à l'origine de l'EPIcx de Paris. Les membres de cette unité de l'Inserm appartiennent à la troisième génération d'épidémiologistes computationnels (surtout des doctorants au milieu de la vingtaine) et sont, à la différence de leurs homologues de l'ISI, uniquement tournés vers l'étude des épidémies.

De manière similaire au directeur du MoBS, les autres pionniers de cette nouvelle spécialité ont abouti, souvent par hasard, à la modélisation épidémiologique, les maladies infectieuses n'étant initialement vues que comme un cas d'étude intéressant (parmi d'autres) pour leur discipline. Mathématicienne de formation, la *project leader* de l'équipe MCEpi du Los Alamos National Laboratory est par exemple arrivée à la modélisation épidémiologique grâce à une école d'été sur le sujet. De fil en aiguille, elle, comme d'autres fondateurs du domaine en question, tous ayant entre quarante et cinquante ans aujourd'hui, finit par se spécialiser, grâce à des financements par projet fournis par le LANL. Au sein de son équipe, rares sont les étudiants qui la rejoignent parce qu'attirés par l'épidémiologie en tant que telle : la plupart d'entre eux – informaticiens, statisticiens, mathématiciens – répondent aux appels d'offre disponibles et, pour quatre de nos interviewés sur cinq, l'épidémiologie n'est qu'un de leurs domaines d'étude.

Par ailleurs, si en temps de pandémie les recherches scientifiques se redirigent souvent vers la compréhension de l'urgence en cours, la vie des épidémiologistes en général, et des computationnels en particulier, a été littéralement rythmée par l'irruption de leur objet d'étude dans l'histoire récente, comme l'atteste le témoignage de cette chercheuse basée à Paris :

« J'ai vécu la pandémie [de H1N1] en Italie. Ensuite je suis arrivée à l'Inserm [...] Je cherchais un endroit où [les] contacts [avec les décideurs] étaient plus simplifiés de manière à ce que mon travail devienne utile. Vivre l'époque de la pandémie est au-delà de la recherche que l'on fait normalement. C'est une chose en temps réel, où l'on prend

des décisions politiques. Je voulais faire cela en mode permanent » (EPIcx, 24.07.15).

L'émergence de l'épidémiologie computationnelle est en somme le résultat de parcours individuels faits de reconversions interdisciplinaires, de rencontres fortuites, de la disponibilité de financements publics pour l'étude des épidémies et d'un contexte historique caractérisé par des « *tempêtes microbiennes* » (Zylberman, 2013).

La consécration en tant qu'experts en santé publique

Avant de devenir un point de passage obligé des comités scientifiques gouvernementaux pendant la crise de la COVID-19, les épidémiologistes computationnels ont dû passer par plusieurs épreuves (Chateauraynaud, 2004). Le premier argument que nos interviewés donnent pour expliquer la croissante légitimité de leur spécialité concerne l'acquisition du langage propre à l'épidémiologie, par rapport à laquelle ils se voient toujours comme des *outsiders* : « *Tu cherches à reformuler ton travail dans le jargon de ces champs-là [...] et d'introduire ton point de vue, ton outillage technique* » (MoBS, 11.07.16). Le deuxième argument est de nature pragmatique. À la question, « *Êtes-vous encore à la recherche d'une légitimité pour vos modèles ?* », l'une des interviewés répond :

« Je dirais que non, le travail où on a cherché à répondre à cette question c'est celui sur la pandémie [de H1N1], où on a publié des prédictions [...] [P]our chaque pays on a prévu une semaine de pic avec un intervalle de confiance. Dans 83% des cas le pic tombait dans [la] semaine [prévue par nos simulations] » (EPIcx, 24.07.15).

Le résultat crédible pour « *convaincre les collègues du domaine que tu es une personne sérieuse* » ici n'est pas, ou pas principalement, l'exactitude, l'élégance et la nouveauté d'une équation ou d'une ligne de code (MoBS, 12.09.16). La crédibilité réside plutôt dans le fait d'avoir « *pris des risques* » et gagné un « *pari* » en publiant des articles contenant des prédictions sur une épidémie en cours (*ibid.*). Cela s'accompagne, troisièmement, d'un effort de recherche de contact avec le monde des professionnels de santé. Pour tous nos interviewés, tisser des liens de confiance et de collaboration

avec épidémiologistes, médecins et décideurs politiques est l'élément le plus important du processus de légitimation.

En quatrième lieu, le rite qui les consacre définitivement est institutionnel, car le fait de se faire embaucher en tant qu'épidémiologistes par une institution publique, comme un hôpital ou une université, ressemble à un « *rite de passage* » ou au franchissement d'une « *ligne* » qui leur confère, non seulement du capital social et économique, mais aussi du « *pouvoir symbolique* » (Bourdieu, 1982). Celui-ci leur permet de se faire entendre des pouvoirs publics et d'accroître leurs financements de recherche. En prenant pour exemples deux de ses collègues, une interviewée de l'ISI explique que ce qui peut sceller la conversion complète au métier d'épidémiologiste, c'est la capacité de « *coloniser* » les espaces institutionnels de la santé publique :

« X [...] travaille maintenant dans un institut de santé publique [l'Inserm]. C'est quelqu'un qui est venu du monde de la physique [...] et maintenant est un *public health officer*. Du coup elle a fait la transition complète [...] Y vient de l'informatique mais travaille [...] au *Boston Children's Hospital* [...] donc il a été nécessaire de coloniser tout une série d'instituts de santé publique pour commencer à avoir de la crédibilité » (ISI, 16.02.17).

Si une spécialité est une profession au nom de laquelle un individu est embauché par une institution (Goldstein, 1984 ; Gingras, 1991), alors l'épidémiologie computationnelle ne l'est pas encore à part entière. Le champ d'appartenance de ceux qui s'en réclament reste, en effet, la physique ou bien l'étude des réseaux : les congrès annuels, les associations professionnelles et les parcours universitaires exclusivement et explicitement consacrés à l'épidémiologie computationnelle sont rares ou font défaut. D'un point de vue de l'expertise toutefois, leurs commanditaires principaux sont les agences, les ministères et les organisations (inter)nationales de la santé. Si leurs modèles sont « *à la fois crédibles et légitimes* » (Cornilleau, 2019, p. 62), c'est parce qu'ils intéressent à la fois chercheurs et politiques. Le trait d'union entre les deux mondes, ce sont les publications scientifiques ayant lieu dans des journaux médicaux prestigieux (*Lancet*, *BMC*, *Epidemics*, etc.). Ce qui montre que, contrairement aux physiciens ayant migré vers l'économie, les épidémiologistes computationnels réussissent à ne pas vivre « *à l'ombre de la physique* » (Gingras et Schinckus, 2012) : l'analyse des

citations dans Google Scholar montre clairement que les articles d'épidémiologie computationnelle les plus cités intéressent tout autant les physiciens, les informaticiens et les mathématiciens que les médecins, les épidémiologistes et autres spécialistes des sciences de la vie.

La science des réseaux tout comme l'épidémiologie traditionnelle sont des domaines reconnus, car ils délivrent des diplômes et disposent d'opportunités de travail, comme le montrent les trajectoires des membres des laboratoires étudiés. Les épidémiologistes computationnels, en revanche, se trouvent dans un processus de constitution d'une nouvelle spécialité, qu'ils espèrent faire reconnaître des professionnels du monde médical. Ils se tournent en effet vers l'arène politique dans le but d'accomplir, plus qu'un « *travail de démarcation* » visant à créer des frontières et une autonomie professionnelle (Gieryn, 1985), une annexion sectorielle. Les épidémiologistes computationnels ambitionnent en effet des postes à l'intérieur des institutions universitaires et de recherche à partir desquelles conseiller le pouvoir, comme l'Imperial College de Londres, le Boston Children's Hospital ou l'Inserm. Si pour interpréter le processus d'émergence de cette nouvelle spécialité l'on adopte la perspective d'Anselm Strauss sur les « *mondes sociaux* » et leur « *segmentation* », on peut remarquer que les épidémiologistes computationnels, grâce à l'importation d'une nouvelle technique dans le domaine de la santé publique, sont en passe de créer un nouveau « *sous-monde social* » et une nouvelle « *arène* » (Strauss, 1978, 1984). Mais plus que par un processus conflictuel ou d'« *éclatement* » (*splintering off*), ils sont en train de le faire plus pacifiquement par « *bourgeoisement* » (*budding off*), à partir de la communauté des spécialistes des réseaux, ainsi qu'à travers l'« *intersection* » entre modélisateurs et professionnels de santé publique. Dans ce sens, nos acteurs relèvent, en ce qui concerne l'étude des réseaux épidémiques, du modèle professionnel académique, dans lequel leurs principaux interlocuteurs demeurent les collègues scientifiques et à la fois, en ce qui concerne l'expertise à usage politique, du modèle « *hybride* » et « *adhocratique* », basé sur l'ajustement contingent face aux requêtes de commanditaires externes comme l'État (Abbott, 1988 ; Whitley, 1984). L'épidémiologie computationnelle est donc en même temps une *spécialité en voie de formation*, car elle n'a pas encore les moyens de se reproduire institutionnellement à travers les cours, postes de travail et revues spécialisées, et une expertise reconnue à la *frontière* entre deux communautés académiques et la sphère politique.

DIVISION DU TRAVAIL EN ÉPIDÉMIOLOGIE COMPUTATIONNELLE

Le travail de *data scientist*

Quels que soient le laboratoire et la spécialité d'origine de nos interviewés, tous s'accordent à dire que les opérations de collecte et de préparation des données sont les plus chronophages :

« C'est très pénible ; à vue de nez, dans le monde des sciences des données, on dépense entre 85 et 90% du temps à travailler avec des données. Les nettoyer, les mettre dans une forme qui les rende exploitables... puis le reste du temps on fait tourner les modèles » (MCEpi, 29.09.16).

Ces chercheurs travaillent sur des représentations condensées et mathématisées de données collectées par des organismes publics (hôpitaux, instituts de statistiques, agences de santé), par des institutions comme la NASA – pour les données satellitaires – et par l'*International Air Transport Association* (IATA) – pour les vols de l'aviation commerciale. Ils travaillent aussi sur des bases de données issues d'Internet qu'ils récupèrent après les avoir demandées et payées aux entreprises qui les détiennent (Twitter, Google...). Dans ce dernier cas, les chercheurs développent des programmes spécifiques afin d'extraire les données à travers les interfaces de programmation applicative, sorte de portes que les réseaux sociaux peuvent ouvrir à des acteurs payants pour télécharger leurs métadonnées. Certains modélisateurs, appartenant à l'ISI, au MoBS et à d'autres centres américains et européens, ont lancé le terme d'« *épidémiologie digitale* » pour mettre l'accent sur cette source de données non-traditionnelles qui permettrait de détecter des maladies difficiles à surveiller autrement, comme la grippe annuelle, par rapport à laquelle les malades ont plus de chance de déclarer leur état de santé sur les réseaux sociaux qu'auprès des institutions sanitaires publiques (Salathé, Bengtsson *et al.*, 2012). Les épidémiologistes computationnels peuvent également travailler en collaboration avec des groupes de recherche ou d'intervention présents sur le terrain qui captent des données par questionnaires qu'ils administrent aux patients d'une clinique, par tags portés par toute une population d'un centre de santé pour tracer les contacts en face-à-face, ou par pièges à moustique que des entomologistes

distribuent à plusieurs endroits sur un territoire donné afin d'estimer le nombre d'individus de ce vecteur.

Une fois collectées, les données, qui se trouvent dans des formats très hétérogènes, doivent souvent être travaillées avant de pouvoir être exploitées. Elles ne peuvent, en effet, être mises en opérabilité qu'à travers un travail qualitatif de discernement, en fonction de théories préalables, d'intuitions contextuelles et d'expériences passées (Didier, 2009). Nos acteurs travaillent les données à travers plusieurs pratiques. En premier lieu, les pratiques d'agrégation de données hétéroclites – par exemple l'ensemble des vols de la planète avec la population des différents pays du globe – portent à produire une nouvelle couche d'informations ou « *méta-collecte* » de données, qui peut ensuite être mise à disposition en ligne pour que d'autres chercheurs et surtout les pouvoirs publics puissent s'en emparer (MoBS, 12.07.16). Les pratiques de transformation scalaire interviennent lorsque certaines cartes se révèlent trop détaillées pour les finalités de prédiction des modélisateurs. En effet, tandis que les modèles à base d'agent peuvent simuler ville par ville, rue par rue, mais ne peuvent prendre en compte que l'échelle nationale ou continentale des pays développés dont on possède des données riches et précises (USA, Europe), les simulations par réseaux permettent de simuler le monde entier avec une résolution plus basse (d'une échelle d'1 pour 1 km à une échelle de 20 pour 20), afin d'inclure les pays du Sud dont les données sont discontinues et peu fiables. Enfin, nous avons également observé des pratiques de production d'informations manquantes à partir de données disponibles. En effet, les scientifiques doivent parfois compléter les bases de données, en faisant un usage inventif et combinatoire des informations qu'ils détiennent. Un exemple de ce remplissage par abduction est donné par une épidémiologiste computationnelle de l'équipe EPIcx à Paris. Cherchant à construire un modèle pouvant simuler les interactions entre tous les pays du monde à partir de données géographiques, démographiques et de mobilité, elle disposait d'une seule source homogène et exhaustive : celle des vols de ligne fournie par l'IATA. En plus de cela, elle disposait d'une quarantaine de bases hétéroclites provenant de différents instituts statistiques nationaux du monde pour ce qui concerne les déplacements pendulaires. Ces bases contenaient « *l'Europe et l'Amérique du Nord, quelques pays de celle du Sud et certains pays asiatiques. L'Afrique était absente pour des raisons évidentes* » (EPIcx, 24.07.15). Sachant que les États de la planète dépassent les deux cents unités, comment faire pour les absents ? « *Un modélisateur modélise les données qu'il a et puis il les applique aux points qui manquent* » (ibid.). En

se basant sur une théorie partagée avec les géographes quantitativistes, cette chercheuse a appliqué le « *modèle gravity law* » pour produire les données faisant défaut, car, au sens de la métaphore newtonienne, les déplacements pendulaires tendent à aller vers la ville voisine la plus importante : « *nous sommes partis des aéroports, en les considérant comme des bassins d'attraction d'un certain type de mobilité* » (*ibid.*). Afin de préciser les données, notre interlocutrice a employé un autre expédient pour reconstruire la distribution de la population africaine sur les territoires nationaux : à partir d'une base de données satellitaires de la NASA, elle a notamment mis en relation la densité lumineuse émise par les centres urbains avec les populations connues des différents pays du continent.

Enfin, théoriquement moins élaborées, mais pratiquement aussi lourdes, sont les pratiques d'homogénéisation des données qui, ayant été collectées par des acteurs différents avec des procédures non-standardisées, nécessitent d'être mises à niveau pour pouvoir être exploitées. Une mathématicienne de l'équipe MCEpi prend l'exemple des données sur les moustiques, vecteurs de plusieurs maladies infectieuses que son équipe d'épidémiologistes tient sous contrôle. Collectées par différentes antennes sur le terrain, les données concernant ces insectes ne peuvent être standardisées qu'après avoir compris comment elles ont été collectées au cas par cas. Cette opération chronophage et cognitivement coûteuse présuppose de dialoguer avec ces équipes, pour voir quels pièges à moustique elles ont utilisés, quelles espèces ont été collectées, dans quels pourcentages, dans quels contextes environnementaux, et ainsi de suite. Ces exemples montrent que l'automatisation numérique n'élimine pas la manualité, le travail répétitif, le bricolage, l'intuition et le jugement individuel des chercheurs. Au contraire, elle fait surgir de nouvelles pratiques artisanales en les déplaçant ailleurs (Denis, 2018 ; Casilli, 2019).

La modélisation et la simulation par ordinateur

La modélisation est ici entendue comme le processus de construction verbale ou mathématique d'une théorie décrivant le fonctionnement d'un système ; la simulation, comme le processus d'évolution computationnelle d'un modèle dans un support informatique qui le déploie dans le temps et le teste sur des données (Varenne et Silberstein, 2013). Modélisation et simulation sont, avec la préparation des données, des tâches effectuées principalement par les épidémiologistes computationnels, qui ont des capacités de codage

suffisantes pour traduire en langage informatique leurs théories et formules mathématiques.

Dans leurs modèles, les agents numériques représentant des populations humaines peuvent passer par de nombreux états différents (sains, non-contagieux, en incubation, pré-symptomatiques, contagieux-symptomatiques, contagieux-asymptomatiques), qui se déclinent dans plusieurs activités et états (faible ou forte contagiosité, à la maison, hospitalisé, guéri). Une série d'actions peuvent être menées sur le programme informatique. Le « paramétrage » sert à trouver le nombre de paramètres que le chercheur doit insérer dans le modèle, ce qui relève d'un choix en amont dépendant des questions de recherche. La « calibration » sert à trouver la valeur des paramètres inconnus, déduits à partir de l'interaction entre paramètres connus. L'« ajustement » (*tweaking*) consiste à faire varier les paramètres pour voir comment se comporte le modèle. Ensuite le « réglage » (*tuning*) implique l'exploration des valeurs d'un paramètre ou d'un ensemble de paramètres, pour voir lesquelles collent le plus aux statistiques officielles dont disposent les chercheurs. Vient enfin la « validation » du modèle, qui est d'abord syntaxique ou formelle, les chercheurs « compilant » le code pour tester automatiquement sa cohérence interne. Elle est en outre quantitative lorsque les scientifiques valident leurs modèles par rétropolation ou *backcasting*, une procédure dont la logique repose sur la recherche d'une isomorphie visuelle et mathématique entre l'histoire connue d'une épidémie et la simulation numérique de cette même épidémie. Comme l'explique une épidémiologiste de l'EPIcx, la recherche de l'isomorphie se fonde sur une confiance dans l'homologie formelle entre l'ontologie du modèle et l'ontologie de l'épidémie :

« [La simulation] est une abstraction de la forme. S'il existe une forme réelle, la forme de la simulation est une abstraction de la forme réelle. [...] Quand [la simulation] fonctionne ça veut dire que les phénomènes que j'ai capturés là-dedans sont effectivement les phénomènes réels » (EPIcx, 09.05.17).

Cette conviction ontologique, c'est ce qui permet aux épidémiologistes computationnels de faire confiance à leurs simulations (Li Vigni, 2021a). Mais pour utiliser ces dernières de manière prédictive, il faut d'abord leur faire « prévoir » un événement dont on connaît la fin. Tandis que le

forecasting vise à anticiper le futur à partir de données en temps réel, le *backcasting* implique de tester les hypothèses d'un modèle à partir d'un événement passé connu. Si les motifs entre les deux coïncident, le modèle commence à être utilisé de manière prédictive.

Chacune des équipes d'épidémiologie computationnelle existantes utilise différents modèles de simulation et plusieurs d'entre elles développent également des plateformes. Bien que nos interviewés sachent tous coder, la distinction entre l'« *engine* » et le « *software* » désigne une division du travail dans le processus de numérisation des modèles. À chacune de ces deux entités informatiques correspondent notamment deux rôles différents :

« L'*engine* a été développé par moi et par d'autres, dit une ex-physicienne devenue épidémiologiste [...] Mais une chose c'est le code que j'ai dans mon ordinateur, que je peux réutiliser demain s'il y a une nouvelle épidémie. Autre chose c'est le *software*. Là tu as besoin d'une expertise que moi je n'avais pas » (EPIcx, 24.07.15).

Cette expertise, qui améliore et complexifie la mise en forme digitale et l'ergonomie des modèles des épidémiologistes, revient à des codeurs plus experts et notamment à des informaticiens professionnels. C'est grâce à eux que le modèle peut être exporté et rendu accessible pour des publics variés.

Le développement informatique des plateformes

Au LANL, les chercheurs de l'équipe MCEpi pourraient disposer d'EpiSimS, la plateforme de simulation épidémique la plus ancienne en circulation – à l'origine une plateforme de simulation du trafic urbain (Mniszewski, Del Valle *et al.*, 2008). Le conditionnel est de rigueur, car la plateforme est en pause depuis 2010 à cause du coût prohibitif des données privées que l'équipe serait contrainte de payer pour renouveler sa base. Programmé en C++, ce logiciel de modèles à base d'agent est capable de simuler l'ensemble des États-Unis avec une précision remarquable en ce qui concerne la géolocalisation des déplacements et les interactions entre les agents à l'intérieur des bâtiments.

Les trois autres laboratoires étudiés développent, avec deux autres équipes basées à Bloomington et Trente, la plateforme GLocal Epidemic and

Mobility visualization (GLEaMviz) (van den Broeck, Gioannini *et al.*, 2011). L'approche qui en est à la base mélange métapopulation et physique des réseaux. L'espace y est discrétisé pour permettre de diviser le monde en plusieurs sous-réseaux. Un nœud y représente une population d'humains ou d'animaux et les liens correspondent aux trajectoires de mobilité entre les nœuds. Comme le dit l'une des épidémiologistes, « *il n'y a pas de modèle universel* » pour toutes les maladies et chaque maladie et chaque question de recherche/action ont « *un modèle disons optimal* ». Ainsi, « *il existe de très nombreux modèles de GLEaM* », tandis que « *le software est unique* » (EPIcx, 09.05.17). Les modèles sont du « *code pur, in house* » et servent à faire avancer la compréhension des différentes maladies, les théories épidémiologiques et l'anticipation de leur évolution. Chaque chercheur peut développer son propre code « *pur* », opérationnel et sans interfaces *user-friendly*, dans son ordinateur. En revanche, le développement du software est centralisé : les équipes contribuent régulièrement à de nouvelles lignes de code, mais leur intégration se fait uniquement à l'ISI, où quatre personnes en sont chargées à plein temps. GLEaMviz est plus ordonnée et figée que le code « *pur* », possède une interface intuitive et s'adresse aux décideurs politiques et aux professionnels de santé.

Des quatre personnes qui développent le software à Turin, deux sont informaticiens, un est physicien et celui qui coordonne l'équipe a une formation d'astrophysicien ainsi qu'une longue expérience en tant que chef de projet dans des entreprises privées du numérique. Si le physicien s'occupe d'implémenter le modèle théorique dans l'« *engine* » (lequel contient le modèle mathématique, tourne sur des serveurs puissants et traite les données), les deux informaticiens développent la partie « *client* », à savoir l'interface téléchargeable. Le coordinateur, quant à lui, code la partie « *proxy* », composée d'un « *middleware* » qui connecte le « *client* » avec l'« *engine* », dispatche les travaux des usagers, collecte les données de la simulation et les restitue sous forme de graphes. L'utilisateur peut dessiner des modèles compartimentés arbitraires, décider les caractéristiques de chaque compartiment (mobilité des classes d'individus, degré de saisonnalité d'une maladie), établir les conditions temporelles et géographiques initiales, le profil immunitaire de chaque population, le nombre de simulations stochastiques à réaliser, ainsi que la durée de chaque simulation (traduite en nombre de jours virtuels).

Le premier usage de GLEaMviz est interne : les équipes l'utilisent à but scientifique et d'aide à la décision. Le deuxième usage est didactique : la plateforme est employée par les chercheurs de l'ISI et de l'EPIex dans leurs cours universitaires. Les agents de santé l'utilisent, enfin, pour anticiper des épidémies en cours. Lorsque l'une des équipes mutualisant la plateforme nécessite de réaliser un nombre élevé de simulations (jusqu'à des millions), elle s'appuie sur des *data centers* d'Amazon ou de Google loués par la Northeastern University (jusqu'à 40.000 ordinateurs peuvent être employés en même temps pendant plusieurs semaines). D'après nos interviewés, l'avantage des *data centers* privés serait leur flexibilité d'usage : « *nous pourrions acheter un superordinateur, mais sa maintenance coûte chère et probablement il resterait sous-utilisé 99% du temps* » (chef de projet à l'ISI, 16.02.17).

La visualisation des données

Puisque l'équipe du LANL ne dispose pas de personnel employé uniquement pour visualiser les données, concentrons-nous sur GLEaMviz qui dispose de deux designers-informaticiens qui travaillent à temps partiel pour développer des interfaces de visualisation sophistiquées pour les différentes équipes mutualisant cette plateforme. L'un d'eux explique la nature des données sur lesquelles leurs équipes travaillent :

« les données [prises en compte par GLEaMviz] sont multidimensionnelles, et donc il faut quelqu'un qui fasse des instruments adéquats pour ce type de données-là. L'on ne peut pas utiliser des instruments normaux – histogrammes, graphes, etc. –, il faut des compétences spécifiques » (designer de l'ISI, 15.02.17).

À partir du travail de ces designers, GLEaMviz génère une carte dynamique réaliste et colorée, ainsi qu'une série de diagrammes décrivant l'évolution géo-temporelle des maladies simulées. La visualisation résultante est interactive, chaque carte venant accompagnée d'un graphe. Le tout est ensuite visualisable sous la forme d'une vidéo fluide qui fournit une vision d'ensemble facile à interpréter.

L'un de ces designers est basé à Turin, l'autre à Boston, les deux sont issus de l'École Polytechnique de Milan avec une formation en *interaction design* ou design numérique, une discipline qui regroupe les pratiques de conception de systèmes, produits et services digitales à partir des nécessités des usagers. Cette activité « *entre l'art et la science* » (designer du MoBS, 12.09.16) a plusieurs objectifs. Le premier, à usage interne aux laboratoires, est heuristique et a des finalités d'exploration des données dans le but de construire graduellement et collectivement une histoire de la maladie :

« En changeant [de manière itérative] les seuils [des données], on voit des choses différentes, imprévisibles. [...] Dans ce partage d'informations avec le public [du laboratoire] devant un écran, il y a quelqu'un qui remarque quelque chose, quelqu'un d'autre remarque autre chose, et c'est ainsi que petit à petit l'on trouve une narrative » (designer du MoBS, 12.09.16).

Le fait de visualiser les données sous différentes formes permet aux chercheurs de trouver des erreurs, des manques de synchronie ou de standardisation dans leurs bases. Il est en outre possible d'« *explorer dans le détail un certain nombre de paramètres spécifiques* » ; « *avec nos méthodes* », faites d'infographies et tableaux de bord, « *tu ne peux plus voir l'ensemble des données, mais tu peux naviguer dedans, tu peux les filtrer, les voir représentées de manières différentes* » (designer de l'ISI, 15.02.17). En premier lieu donc, la visualisation fait fonction d'aide à la recherche dans le but de tester ou d'écarter des hypothèses et de construire un discours théorique. La deuxième fonction de la visualisation est une fonction de médiation : pour exploiter les résultats des simulations en dehors des laboratoires, et notamment auprès des décideurs politiques, les équipes doivent fabriquer des « *images-instruments* » représentant des données foisonnantes et complexes de manière esthétiquement agréable et intellectuellement accessible (*ibid.*).

L'interaction avec les pouvoirs publics

Tous nos interviewés affirment être en contact constant avec les pouvoirs publics, et ce au moins depuis la pandémie de H1N1 (2009-2010). Les relations sont généralement entretenues par les chefs d'équipe, qui effectuent, seuls ou accompagnés par des collègues plus jeunes, à la fois le

travail de recherche de fonds, de lobbying et de conseil. Si le rapport de la MCEpi avec le gouvernement est direct – le LANL dépendant du département de sécurité nationale américain –, les équipes de Boston, Paris et Turin soulignent l'importance du travail de construction de liens, qui doit se faire lors des conférences, des cours de formation, des crises sanitaires, mais aussi durant des périodes plus apaisées. L'acceptation des nouveaux modèles computationnels par les pouvoirs publics et leur adoption par les experts traditionnels de la santé publique ne vont pas de soi. C'est pourquoi ce travail de contact doit se faire, selon nos interviewés, « *peu à peu* » et « *avec humilité* », pour « *se frayer un chemin* » vers les décideurs (MoBS, 12.09.16). Un jeune biologiste de l'équipe MCEpi rappelle le faible nombre de commissaires à la santé publique, la grande charge de travail à laquelle ils sont soumis (notamment en temps de crise), aussi bien que leur relative imperméabilité à l'apprentissage d'outils inhabituels : « *ils n'ont pas le temps... si l'outil ne rentre pas dans leur flux de travail immédiat, ils ne l'utilisent simplement pas* » (MCEpi, 29.09.16). Comme le témoigne ce même interviewé, la légitimité et la généralisation des modèles de l'épidémiologie computationnelle exigent un travail graduel, un « *processus de socialisation* », afin de faire rentrer leurs techniques dans la « *routine* » des professionnels de santé (*ibid.*). Les rapports étant hiérarchisés, les chercheurs ont d'abord tissé des alliances avec des épidémiologistes « *déjà en contact avec les décideurs politiques* » (*ibid.*), puis avec ces derniers pour qu'ils remontent éventuellement le contenu de l'expertise jusqu'au gouvernement. Dans les trois pays pris en considération, les rapports avec les agences de santé ont été facilités par la présence, en leur sein, de médecins épidémiologistes ayant modélisé eux-mêmes avec les outils computationnels (USA, Italie), ou les appréciant (France).

Comme le GIEC dans le domaine du climat, les agences de santé nationales sont censées relier le scientifique avec le politique (Dahan et Guillemot, 2006). Aux États-Unis, les équipes étudiées participent à un groupe appelé *Models of Infectious Disease Agent Study* (MIDAS), un « *centre d'excellence* » créé par le NIH en 2004 et réunissant « *un pool de modélisateurs* » proposant une variété de méthodes d'anticipation, dont la force résiderait dans leurs différences et complémentarités (MoBS, 12.09.16). Les chefs d'équipe peuvent également être reçus personnellement par la Maison Blanche devant une « *cinquantaine de décideurs* », dont les « *17 responsables des infrastructures critiques du pays* » (eau, santé, transports, finance, etc.) (MCEpi, 29.09.16). Lors de la crise de la COVID-19, l'équipe du MoBS a quant à elle fait partie du comité scientifique

présidentiel avec trois autres équipes basées aux USA et au Royaume-Uni, chacune porteuse de modèles différents. Le fondateur du MoBS met l'accent, dans les entretiens, sur le fait que la confiance dans les modèles doit se construire à partir d'une collaboration constante avec les pouvoirs publics pour parler une même langue – les « *intersections* » entre « *mondes sociaux* » nécessitent un « *langage pidgin* », voire un « *créole* » (Galison, 1997), permettant aux différents professionnels de se comprendre entre eux :

« dans la lecture des résultats des modèles on doit être très très prudents. Ça c'est quelque chose qui se fait à deux, en travaillant beaucoup [avec les pouvoirs publics] [...] Chaque crise épidémique, c'est pour nous une occasion de travailler avec eux pour développer un langage commun » (MoBS, 12.07.16).

En France et en Italie aussi, les équipes des laboratoires de l'EPIcx et de l'ISI collaborent régulièrement avec celles de Santé publique France (SpF) et de l'*Istituto Superiore di Sanità* – interfaces entre la recherche et le Ministère de la Santé qui ont comme tâches la préparation de scénarios, de protocoles sanitaires et de recommandations d'intervention. Les agences de santé française et italienne sont en contact régulier avec un réseau d'équipes de recherche déployées sur le territoire à travers des newsletters hebdomadaires et des réunions présentes plus espacées. En temps « *froid* », cet écosystème sert à « *fluidifier* » les rapports entre les acteurs et à surveiller les maladies de type grippal saisonnières (grippe, influenza, varicelle, rougeole, etc.) (EPIcx, 09.05.17). Ces équipes ont pu développer chacune dans son pays un site internet participatif – Influenzane.fr en France et Inluweb.it en Italie – pour permettre aux citoyens de se déclarer en ligne lorsqu'ils sont atteints par une de ces maladies. En Italie, les données collectées par ces portails sont transférées à un rythme hebdomadaire à l'ISS : « *même les opérateurs sanitaires nationaux savent qui nous sommes et utilisent nos données* » (ISI, 16.02.17). Malgré la réticence initiale de SpF vis-à-vis de cet outil, et en partie grâce au « *grand enthousiasme* » du Réseau Sentinelles¹⁰, la France est louée par la directrice de l'équipe EPIcx pour avoir l'un des systèmes les plus intégrés d'Europe en

¹⁰ Il s'agit d'un réseau de recherche et de veille sanitaire mis en place par l'Inserm et Sorbonne Université en 1984, visant entre autres à constituer de grandes bases de données en médecine générale et en pédiatrie, et à développer des outils de détection et de prévision épidémique.

matière de monitoring de la santé publique (EPIcx, 09.05.17). Les rapports d'échange entre SpF et l'équipe de l'Inserm ne sont pas unidirectionnels, les scientifiques réussissant à participer avec l'agence nationale à la rédaction de protocoles pour la collecte des données épidémiologiques. Dans le cas de l'épidémie du syndrome respiratoire du Moyen-Orient (MERS-CoV) en 2012, l'équipe EPIcx a travaillé avec SpF depuis la phase de collecte des données jusqu'à la publication d'un article scientifique commun. En cas de crise, le Ministère saisit les agences de santé, lesquelles se tournent alors vers les équipes de recherche qu'elles connaissent « *pour avoir une expertise biomathématique [qu'elles] intègrent à [leur] expertise épidémiologique* » afin de produire différents scénarios de l'épidémie en cours (SpF, 28.06.18).

L'activité de scénarisation a souvent été décrite par les sciences sociales comme une modalité médiatique visant à prévenir et éviter un choc traumatique dans le public : il s'agit moins de prévoir le futur de manière exacte que de faire proliférer des futurs possibles pour éviter les surprises et pour « *penser l'impensable* » (Anderson, 2010). La mise en variation des possibilités se traduit, dans le cas des plateformes épidémiologiques, par la multiplication des variables modifiables à l'envi par l'utilisateur dans le tableau de bord. Mais les scénarios posent problème : « *au ministère, dit un agent de santé, ils ont l'impression ou en tout cas l'espoir que la modélisation va répondre à toutes les questions* », alors que les modèles ne vont pas « *résoudre l'incertitude* » mais plutôt aider à la « *gérer* » (SpF, 28.06.18). Les épidémiologistes et les agents ont en effet tendance à présenter les données sous forme d'intervalles, mais cela peut souvent « *décevoir* » les décideurs qui demandent plus de précision :

« si tu dis, cela varie, disons, entre cent et un millier, alors eux ils disent, pouvez-vous nous donner juste un chiffre ? [...] Si nous avons une moyenne ou une médiane, nous disons, voilà l'intervalle et voici la moyenne qui est, je sais pas, trois cent. [...] Ils n'aiment pas les intervalles parce qu'ils ont du mal à comprendre l'incertitude » (MCEpi, 29.09.16).

L'impact concret de l'activité de conseil de nos interviewés est « *difficile à dire* », puisque, « *tout comme [les décideurs] nous sollicitent nous, ils sollicitent d'autres équipes* » (chef de projet à l'ISI, 16.02.17). En situation d'incertitude, les pouvoirs tendent en effet à suivre une logique pluraliste, à

ne pas remplacer les vieux instruments par des nouveaux mais à les considérer comme complémentaires (Aykut, Demortain *et al.*, 2019). Cela dit, les modèles épidémiologiques des équipes étudiées ici (ainsi que ceux d'autres équipes) semblent avoir eu un impact important sur la gestion de la COVID-19, qu'il conviendra d'évaluer dans des recherches futures.

Imaginaire global et objectifs de long terme

Si le travail de conseil des épidémiologistes computationnels se tourne vers les gouvernements nationaux, leurs visées de veille sanitaire sont planétaires. Depuis les années 1980, et plus encore à partir des années 2000, le terme de « santé globale » n'a eu cesse de se répandre dans les milieux médicaux du monde entier (Gaudillière, 2016 ; Hinchliffe et Craddock, 2015). Porté par plusieurs institutions politiques internationales, des fondations privées et des ONG, ainsi que par des centres de recherche, il désigne à la fois l'indissoluble interconnexion du monde environnemental, biologique et sociotechnique, et le souhait de ces acteurs de dépasser les limites financières et bureaucratiques des dispositifs sanitaires internationaux issus de l'après-guerre. Les épidémiologistes computationnels s'inscrivent à leur façon dans ce paradigme.

De part et d'autre de l'Atlantique, nos interviewés regardent la météorologie comme modèle. Leur objectif est d'arriver un jour à une infrastructure de surveillance mondiale capable de fournir aux décideurs et aux populations une prévision épidémique en temps réel : nos interlocuteurs du LANL l'appellent « *meteorological computational epidemiology* » et écrivent des articles d'opinion pour la faire advenir (MCEpi, 29.09.16). Mais tandis que les équipes française et italienne se contentent d'interagir avec les instituts nationaux, la spécificité des chercheurs travaillant sur le sol étatsunien réside dans leur travail de lobbying auprès de la Maison Blanche, dans l'objectif de constituer une nouvelle agence nationale de surveillance épidémique, sur le modèle de la National Oceanic and Atmospheric Agency (NOAA). Les équipes de Los Alamos et Boston ne sont d'ailleurs pas les seules équipes américaines qui, de manière à la fois autonome et coordonnée, font pression à Washington pour mettre en place ce nouvel organisme.

Sur le long terme, nos interviewés envisagent la création d'applications pour smartphone pouvant fournir, à côté du temps prévu pour la journée, la probabilité de contracter telle ou telle maladie dans un lieu et à un moment donnés. Or, pour en arriver à un tel dispositif, les épidémiologistes computationnels savent bien qu'il faut une métrologie imposante. On devrait, d'après eux, avoir des « *laboratoires diagnostics* » dans chaque pays, y compris dans les zones rurales, « *tout cela connecté via satellite pour une analyse de données immédiate* » (MoBS, 14.09.16). On devrait, en outre, faire collaborer chercheurs, gouvernements et compagnies téléphoniques pour utiliser, de manière plus ou moins volontaire et en respectant les « *libertés civiles* », les données mobiles à propos des déplacements des citoyens (Oliver, Letouzé *et al.*, 2020). Mais – et c'est bien l'un des arguments qu'ils utilisent vis-à-vis des décideurs –, cette métrologie serait plus économe que celle vouée à l'étude du climat (Edwards, 2010), d'autant plus qu'elle fonctionnerait par intermittence.

À la lumière de cela, les épidémiologistes computationnels relèvent, d'un côté, du « *régime de santé global* » qui n'admet pas de points aveugles dans la trame mondiale (Lakoff, 2015) et qui rêve d'une « *préparation généralisée* » (Collier et Lakoff, 2008), et, de l'autre, du régime de la « *vigilance* » au sens de Chateauraynaud et Torny (1999), reposant sur une politique qui « *donne lieu à la création de multiples dispositifs organisés en réseau et visant à faire remonter l'ensemble des événements ou des comportements suspects* » (p. 28) par le biais de « *sentinelles* » déployées sur les territoires (Lakoff et Keck, 2013). Si les épidémiologistes computationnels se greffent sur un système de vigilance rodé, ils souhaitent y ajouter de nouveaux dispositifs, de nouveaux capteurs, de nouveaux centres de calcul.

La communication médiatique

Affiliée au département de l'énergie et à celui de la sécurité nationale américains, l'équipe du LANL tend à rester discrète tant au niveau médiatique qu'au niveau scientifique (certains résultats demeurant classés secrets). Les autres équipes d'épidémiologie computationnelle insistent en revanche sur le concept de l'« *outreach* » – terme anglais qui renvoie à la fois au rapport avec les décideurs et à la vulgarisation. Cette dernière passe par la production de communiqués envoyés aux médias par les attachés de presse des laboratoires sous la supervision des chefs d'équipe, par la

production de supports de vulgarisation pour des publics larges, ainsi que par le passage des épidémiologistes computationnels dans les médias. Les communiqués de presse peuvent annoncer des financements reçus par un organisme ou bien la publication d'un rapport sur une crise en cours. Les supports de vulgarisation peuvent aller des cartes exposées dans les musées stylisant la diffusion des épidémies dans le monde jusqu'aux « *coffee table book* », sorte de livres d'images illustrant les potentialités de l'épidémiologie computationnelle, en passant par des vidéos animées représentant l'évolution d'une pandémie sur une carte tridimensionnelle. Quant aux passages médias, ceux-ci peuvent se focaliser sur la trajectoire scientifique inhabituelle des modélisateurs, sur leurs estimations à propos de l'évolution d'une épidémie en cours, sur les prescriptions en matière de mesures à prendre pour endiguer la maladie, ainsi que sur les positions en faveur ou en défaveur d'une nouvelle technologie (e.g. télémédecine, site internet participatif, application de traçage, etc.). Dans tous les cas où elle a lieu, l'apparition médiatique est préparée activement par les épidémiologistes, le travail d'« *outreach* » étant considéré comme partie intégrante de leur profession d'experts.

RETOUR SUR L'ÉPIDÉMIOLOGIE COMPUTATIONNELLE A LA LUMIÈRE DE LA PREMIÈRE VAGUE DE LA COVID-19

L'appréciation des effets de la COVID-19 sur la communauté d'épidémiologistes computationnels, et vice versa, ne sera pleinement possible qu'après de nouveaux terrains de recherche. Nous essayerons tout de même, dans cette dernière section, de resituer nos données dans le contexte de la pandémie en cours. Deux points en particulier attireront notre attention : les effets du débat autour des modèles épidémiologiques ainsi que la confirmation et le renouvellement des modalités d'interaction des épidémiologistes computationnels avec les pouvoirs publics.

Retour sur les modèles

Les gouvernements de certains pays comme le Royaume-Uni, la France et les États-Unis ont pris leurs décisions en fonction des modélisations des épidémiologistes computationnels. Dans un article du 30 mars 2020, *Le Monde* par exemple publiait un article intitulé, « *Neil Ferguson, l'épidémiologiste qui murmure à l'oreille de Downing Street* », et sous-titré, « *Au Royaume-Uni, c'est sur la base des modèles de ce chercheur que le premier ministre, Boris Johnson, a finalement décidé le confinement de la*

population »¹¹. L'article expliquait en outre que « *ses modélisations de la propagation de l'épidémie due au coronavirus [...] ont aussi été consultées par les exécutifs français et américain* ». Aux États-Unis, la décision prise fin mars 2020 par le président Donald Trump d'étendre la distanciation sociale à tout le mois d'avril découlait du réseau d'équipes modélisatrices conseillant la Maison Blanche, parmi lesquelles celle du MoBS. En France, c'est surtout Simon Cauchemez, ancien élève de Neil Ferguson, qui a été consulté depuis le début de la crise à travers le conseil scientifique du président Emmanuel Macron¹², même s'il est très probable que les rapports de l'EPIcx, régulièrement publiés en ligne sur le site de l'équipe, ont également été pris en compte par le gouvernement¹³.

Cependant, les prédictions alarmistes des modélisateurs ont été critiquées par des médecins, des infectiologues, des biostatisticiens et des journalistes scientifiques. Certains ont rejeté le fait même de simuler et de faire confiance aux prédictions des pics épidémiques obtenus à travers des méthodes numériques, en qualifiant ceux et celles les ayant prises au sérieux de scientifiques victimes de ce que Friedrich von Hayek appelait la « *présomption de connaissance* » : « *Seuls ceux qui croient avoir déjà compris les facteurs et les relations essentiels peuvent s'attendre à des prévisions réalistes à partir de simulations informatiques* »¹⁴. D'autres, toujours opposant les simulations à la « *vie réelle* », ont condamné les modélisateurs pour avoir tourné « *le dos à l'adaptation et à l'inventivité différenciées, gages de résilience du vivant* », en conseillant « *une réponse uniforme à la plupart des gouvernements* », celle du confinement, sans considérer les dégâts économiques, sociaux et même environnementaux qu'une telle mesure allait entraîner¹⁵. Si ces mêmes chercheurs, et d'autres¹⁶,

¹¹ https://www.lemonde.fr/sciences/article/2020/03/30/neil-ferguson-l-epidemiologiste-qui-murmure-a-l-oreille-de-downing-street_6034945_1650684.html.

¹² <https://www.lefigaro.fr/sciences/coronavirus-qui-sont-les-experts-du-comite-scientifique-charge-de-conseiller-macron-20200313> ; https://www.liberation.fr/sciences/2020/11/03/simon-cauchemez-le-pic-de-cette-vague-en-reanimation-devrait-arriver-mi-novembre_1804291

¹³ <https://aoc.media/analyse/2020/07/09/les-modeles-epidemiologiques-sous-les-feux-de-la-rampe/>.

¹⁴ <https://www.europeanscientist.com/fr/opinion/la-querelle-raoult-serie-le-covid-19-et-l-illusion-dune-societe-de-la-connaissance/>.

¹⁵ https://www.larecherche.fr/covid-19-coronavirus-epid%C3%A9miologie/sortir-dun-confinement-aveugle?fbclid=IwAR3LiaGJD-wc5avFSaIHUm73e4OeikLvU1D0HfteHUWZXvjKXqz7_totTLU.

ont regretté le catastrophisme des modélisateurs en les accusant d'avoir surestimé le nombre de morts, les épidémiologistes computationnels ont, de leur côté, revendiqué les effets bénéfiques de leurs prédictions (malgré les marges d'erreur et les incertitudes qui accompagnent leurs estimations¹⁷). Ils ont souligné le fait que leurs modélisations se basent sur des informations incomplètes et susceptibles d'évoluer. En outre, les activités prospectives de ces chercheurs les mènent à une « *fréquente oscillation entre urgence et anticipation, [qui] conduit les prévisionnistes à produire des cycles de révisions de plus en plus courts, créant une sorte d'obsolescence programmée de leurs propres pronostics* » (Chateauraynaud, 2013, p. 304) : une campagne de vaccination ou l'annonce même de l'arrivée d'une pandémie changent l'état du système et créent des nouvelles configurations, puisque le public réagit aux nouvelles informations en changeant son comportement.

Si des interventions médiatiques pointant à la fois les forces et les faiblesses des modèles numériques n'ont pas manqué¹⁸, de nombreux scientifiques, de tout bord disciplinaire, ont souhaité apporter des critiques constructives à la faveur des épidémiologistes computationnels. Un manifeste paru en juin 2020 dans *Nature* en est un exemple notable : signé par 22 chercheurs en sciences sociales, il est intitulé « *Five ways to ensure that models serve society* » (Saltelli, Bammer *et al.*, 2020). Dans ce texte, les auteurs conseillent aux modélisateurs de respecter cinq principes pour « *modéliser de manière responsable* » : 1) évaluer l'impact des prémisses des modèles et des incertitudes ; 2) ne pas excéder dans la complexification des modèles pour ne pas compromettre leurs prédictions ; 3) réfléchir au cadrage, c'est-à-dire aux intérêts, aux orientations disciplinaires et aux biais des modélisateurs ; 4) considérer les conséquences des estimations quantitatives sur la confiance politique et citoyenne portée aux modèles, notamment

¹⁶ https://www.courrier-picard.fr/id90997/article/2020-06-09/confinement-critiques-sur-lalarmisme-des-modelisations?fbclid=IwAR35Z0bMCzdS5LD7R34e4RsjNWwcqLX6F9ZtbocLQ_YEnWBFqib_fUfXdGw.

¹⁷ https://www.numerama.com/sciences/624020-covid-19-moins-de-francais-touche-que-prevu-linstitut-pasteur-limpact-enorme-du-confinement.html?fbclid=IwAR2-7CWSp6wquB4V47ovvFTwuxhlJGzbxkb7aCvuwxtQ4CENnUG7Z_jSsf.

¹⁸ https://aoc.media/analyse/2020/04/23/prevoir-ou-expliquer-le-dilemme-de-la-modelisation-de-lepidemie/?fbclid=IwAR2bMAwEEKNwsczwFT_ZJQqE3hwsihlZBKlHfgzPITPpiC4XDKmQQZBUYSk.

lorsqu'elles ne sont pas accompagnées d'une illustration des incertitudes ; 5) admettre enfin les inconnus, surtout pour ne pas donner des alibis aux gouvernements en matière de responsabilité et de transparence. D'autres chercheurs se sont attelés à pointer les éléments dont les modélisateurs devraient tenir compte pour renforcer leurs simulations, par exemple « *l'analyse des réseaux sociaux qui pourrait contribuer à affiner les modèles de diffusion permettant d'armer la lutte contre la pandémie* »¹⁹. Plus généralement, en considérant les impensés qui accompagnent les modèles, des chercheurs en sciences sociales ont réitéré leurs plaidoyers en faveur d'une interdisciplinarité accrue dans le domaine de la recherche et de l'aide à la décision en matière sanitaire (Craddock et Hinchliffe, 2014 ; Gaudillière et al., 2020 ; Keck, 2020). Enfin, bien que les agents de santé et les responsables politiques insistent sur l'importance de la pluridisciplinarité des comités scientifiques gouvernementaux, la prise en compte des cultures et des pratiques sociales des populations reste marginale, y compris au sein des équipes d'épidémiologie computationnelle, dont aucune n'affiche de chercheurs en sciences sociales en son sein.

Retour sur le travail de conseil

Le mode opératoire des modélisateurs épidémiologiques était (lors des épidémies précédentes) et est resté (durant celle de la COVID-19) remarquablement plus souple et indépendant par rapport à celui d'autres comités d'experts mobilisés dans d'autres crises sanitaires, comme celle de la vache folle, où le conseil scientifique était bien plus formellement régulé, pluridisciplinaire et collégial (Granjou et Barbier, 2010). Dans leurs activités de conseil, les épidémiologistes computationnels en général demeurent autonomes et peuvent être sollicités par les décideurs pour une illustration de leurs conclusions, sans forcément être soumis à une collégialité stricte avec les autres équipes d'experts convoquées. Ce que la crise de la COVID-19 a confirmé par rapport aux données collectées entre 2014 et 2018, c'est que ces chercheurs ont réussi à créer des canaux de communication politique alternatifs à ceux traditionnels. Certains ont par exemple créé des bases de données devenues ensuite la référence mondiale de comptabilisation des cas de COVID dans le monde – comme le tableau de bord cartographique de l'Université John Hopkins de Boston²⁰. Beaucoup ont choisi de publier des

¹⁹ https://laviedesidees.fr/Les-reseaux-sociaux-dans-la-lutte-contre-le-Covid-19.html?fbclid=IwAR2bMAwEEKNwsczwFT_ZJQqE3hwsihlZBKIHfgzPITPpiC4XDKmQQZBUYSk.

²⁰ <https://coronavirus.jhu.edu/map.html>.

documents de scénarisation et de conseil politique en libre accès sur Internet. Parfois il s'agit des résultats préliminaires de leurs recherches, parfois de *preprint*. Sorte de documents de « science citoyenne » ou « ouverte », hybrides car scientifiques et prescriptifs, ces textes ont pour but de s'adresser aux collègues, aux décideurs, aux médias et aux citoyens²¹.

En ce qui concerne le paradigme de la santé globale, on peut constater que les épidémiologistes computationnels font face à des difficultés similaires à celles rencontrées par les autres acteurs qui portent l'imaginaire « un monde, une santé » : à savoir la friction avec le local. Malgré leur militance pour une agence de veille épidémiologique planétaire, ils sont les premiers à relever les résistances de terrain liées aux diversités politiques et culturelles des différents pays du monde. Les États ne coopèrent pas en matière sanitaire. Pour que les modèles soient exploitables et mis à jour en contexte d'urgence, il ne doit y avoir ni points aveugles ni formats hétérogènes. Les asymétries entre pays en termes de présence, puissance et efficacité des infrastructures statistiques posent problème : par exemple, les monitorings et les reports sur les épidémies n'arrivent pas au même moment partout, et des régions entières du globe finissent par ne pas être recensées.

Le cas de l'épidémiologie computationnelle montre à la fois la force de l'imaginaire global dans les milieux sanitaires et le fait que la « pluralité des mondes » ne cesse de le mettre à mal (Hinchliffe et Craddock, 2015). Toutefois, les chercheurs ne semblent pas y renoncer : au contraire, l'échec de la gestion globale de la crise COVID leur a permis de rajouter une autre corde à leur arc. Notamment lorsqu'ils écrivent que « *l'Amérique a besoin d'un centre national pour la surveillance des maladies infectieuses, dont la mission sera de monitorer les tendances et fournir une interprétation en temps réel des données épidémiques, à travers la modélisation, la biostatistique et la science des données* »²². Ou lorsque, adoptant une perspective internationale, une chercheuse de l'équipe MCEpi écrit qu'« *un centre de prévision épidémique global (...) permettrait d'anticiper et de [se]*

²¹ Comme le remarque le site du CNRS, « [l]a multiplication des prépublications et la place qui leur a été accordée tant par la communauté scientifique que les médias ou le grand public montrent l'importance d'une diffusion rapide, ouverte mais intègre de la science en période de pandémie » : <http://www.cnrs.fr/fr/cnrsinfo/biologie-la-pandemie-valorise-les-prepublications>.

²² <https://thehill.com/opinion/healthcare/503793-america-needs-a-national-center-for-infectious-disease-intelligence>.

préparer pour les épidémies naissantes plutôt que de simplement réagir à celles qui ont déjà éclatées »²³.

Pour le moment, leur plaidoyer n'est pas encore parvenu à ouvrir un large débat public. À l'issue des négociations sur le programme de relance économique appelé « *Recovery Fund* », l'Europe semble par ailleurs avoir renoncé au budget communautaire pour la santé : en l'état actuel des choses, il serait donc surprenant qu'une telle agence de veille épidémique planétaire soit créée sur le Vieux Continent. Quant aux États-Unis, cela dépendra du nouveau président : voudra-t-il d'une telle agence, dont la première proposition remonte à l'administration de Barack Obama, ou aura-t-il d'autres priorités ?

CONCLUSION

La crise de la COVID-19 a sans doute renforcé l'émergence de l'épidémiologie computationnelle selon au moins trois points de vue. Premièrement, les mêmes chercheurs interviewés ici, ainsi que ceux qu'ils avaient indiqués comme étant leurs homologues dans d'autres institutions et dans d'autres pays, ont presque tous été sollicités d'une manière ou d'une autre par les pouvoirs publics dans le cadre de la gestion de l'épidémie de SARS-CoV-2, en déterminant les décisions gouvernementales autant, et parfois plus que les professionnels de santé traditionnels.

Deuxièmement, même si leur appellatif a pu être instable dans l'espace public, les épidémiologistes computationnels ont à plusieurs reprises été convoqués par les médias de différents pays en tant qu'experts de la prédiction, et même de la gestion des pandémies. Plus particulièrement, le fait qu'ils aient été présentés parfois en tant qu'« informaticiens/physiciens épidémiologistes », parfois simplement avec leur rattachement institutionnel, et rarement comme des « épidémiologistes computationnels », indique bien sûr que le processus de leur légitimation est en cours et que leur identité socioprofessionnelle n'est pas stabilisée. Mais ces mêmes passages médiatiques ont vraisemblablement aidé nos scientifiques à accélérer le premier et à éclaircir la seconde.

²³ <https://www.statnews.com/2020/07/27/forecast-epidemics-like-we-forecast-weather/>

En troisième et dernier lieu, contrairement à ce qui pourrait sembler à première vue, les débats que leurs modèles ont suscités et les critiques parfois virulentes qu'ils se sont attirées, ne les ont pas affaiblis face aux pouvoirs institutionnels, à la communauté scientifique et au grand public. C'est plus probablement le contraire qui s'est produit. D'un côté, l'existence même du débat signale le fait que leurs modèles ont été pris au sérieux : des conseils pour les améliorer sont arrivés de plusieurs bords, ce qui signifie tout sauf un refus de leur travail ; de l'autre côté, l'accent mis par les politiciens sur le nombre de morts que les mesures restrictives ont pu éviter a renforcé la crédibilité des scénarios-catastrophes à l'origine de leurs décisions impopulaires et, partant, celle des épidémiologistes computationnels.

L'auteur remercie Amy Dahan, Sébastien Dutreuil, Hélène Guillemot, Quentin Rodriguez et deux relecteurs anonymes pour leurs commentaires et suggestions.

RÉFÉRENCES

ABBOTT A. (1988), *The System of Professions*, Chicago & London, The University of Chicago Press.

AHRENS W. et PIGEOT I. (dir.) (2014), *Handbook of Epidemiology*, Springer, Dordrecht & Londres, New York, Heidelberg.

AJELLI M., GONÇALVES B., BALCAN D., *et al.* (2010), « Comparing large-scale computational approaches to epidemic modeling : agent-based versus structured metapopulation models », *BMC infectious diseases*, vol. 10, n° 190.

AMSTERDAMSKA O. (2005), « Demarcating epidemiology », *Science, technology, & human values*, vol. 30, n° 1, p. 17-51.

ANDERSON B. (2010), « Security and the future : Anticipating the event of terror », *Geoforum*, vol. 41, n° 2, p. 227-235.

AYKUT S., DEMORTAIN D. et BENBOUDIZ B. (2019), « The Politics of Anticipatory Expertise : Plurality and Contestation of Futures Knowledge in Governance – Introduction to the Special Issue », *Science & Technology Studies*, vol. 32, n° 4, p. 2-12.

BENBOUZID B. (2018), « Values and Consequences in Predictive Machine Evaluation. A Sociology of Predictive Policing », *Science & Technology Studies*, n° 31.

- BERSINI H. (2005), *Des réseaux et des sciences. Biologie, informatique, sociologie : l'omniprésence des réseaux*, Paris, Vuibert.
- BOURDIEU P. (1982), Les rites comme actes d'institution, *Actes de la recherche en sciences sociales*, vol. 43, n. 1, p. 58-63.
- BROECK W. VAN DEN, GIOANNINI C., GONÇALVES B. *et al.* (2011), « The GLEaMviz computational tool, a publicly available software to explore realistic epidemic spreading scenarios at the global scale », *BMC Infectious Diseases*, vol. 11, n° 37.
- CASILLI A. (2019), *En attendant les robots*, Paris, Seuil.
- CHATEAURAYNAUD F. (2004), « L'épreuve du tangible. Expériences de l'enquête et surgissements de la preuve », dans Karsanti, B. et Quéré, L. (dir.), *La Croyance et l'Enquête. Aux sources du pragmatisme*, Paris, EHESS, « Raisons pratiques », p. 167- 194.
- CHATEAURAYNAUD F. (2013), « Regard analytique sur l'activité visionnaire », dans BOURG D., KAUFFMAN A. ET JOLY P.-B. (dir.), *Du risque à la menace*, Paris, PUF, p. 287-310.
- CHATEAURAYNAUD F. et TORNAY D. (1999), *Les sombres précurseurs. Une sociologie pragmatique de l'alerte et du risque*, Paris, Éditions de l'EHESS.
- CHATEAURAYNAUD F. et DEBAZ J. (2018), *Aux bords de l'irréversible. Sociologie pragmatique des transformations*, Paris, Pétra.
- COLLIER S.J. et LAKOFF A. (2008), « Distributed preparedness : the spatial logic of domestic security in the United States », *Environment and Planning D : Society and Space*, n° 26.
- CORNILLEAU L. (2019), « Magicians at Work : Modellers as Institutional Entrepreneurs in the Global Governance of Agriculture and Food Security », *Science & Technology Studies*, vol. 32, n° 4, p. 58-77.
- DAHAN A. (dir.) (2007), *Les modèles du futur*. Paris, La Découverte.
- DAHAN A. et GUILLEMOT H. (2006), « Changement climatique : Dynamiques scientifiques, expertise, enjeux géopolitiques. *Sociologie du travail*, 48(3), 412-432.
- DENIS J. (2018), *Le travail invisible des données. Éléments pour une sociologie des infrastructures scripturales*, Paris, Presses des Mines.
- DIDIER E. (2009), *En quoi consiste l'Amérique ? Les statistiques, le New Deal et la démocratie*, Paris, La Découverte.
- DUBOIS M. (2013), « Introduction », *L'Année sociologique*, vol. 63, n° 2, p. 345-357.

EDWARDS P. (2010), *A Vast Machine. Computer Models, Climate Data, and the Politics of Global Warming*, Cambridge, MIT Press.

EVETTS J., MIEG H. et FELT U. (2006), « Professionalization, scientific expertise, and elitism : A sociological perspective », dans ANDERS ERICSSON K., CHARNESSE N., FELTOVICH P.J. et HOFFMAN R.R. (dir.), *Cambridge Handbook of Expertise and Expert Performance*, Cambridge, Cambridge University Press, p. 105-123.

FREEMAN L.C. (2004), *The Development of Social Network Analysis. A Study in the Sociology of Science*, Vancouver, Empirical Press.

GALISON P. (1999), *Image and logic. A material culture of microphysics*, Chicago, The University of Chicago Press.

GAUDILLIÈRE J.-P. (2016), « Un nouvel ordre sanitaire international ? », *Ecologie politique*, vol. 1, n° 52, p. 107-124.

GAUDILLIERE J.-P., KECK F. ET RASMUSSEN A. (2020), « Des virus, des humains, des savoirs, des épidémies : construction sociale de quoi ? », *Carnet de l'EHESS*, 13/05/2020 : <https://www.ehess.fr/fr/carnet/virus-humains-savoirs-%C3%A9pid%C3%A9mies-construction-sociale>.

GIERYN T.F. (1983), « Boundary-Work and the Demarcation of Science from Non-Science : Strains and Interests in Professional Ideologies of Scientists », *American Sociological Review*, vol. 48, n° 6, p. 781-795.

GINGRAS Y. (1991), « L'institutionnalisation de la recherche en milieu universitaire et ses effets », *Sociologie et sociétés*, vol. XXIII, n° 1, p. 41-54.

GINGRAS Y. et SCHINCKUS C. (2012), « Institutionalization of econophysics in the shadow of physics », *Journal of the History of Economic Thought*, vol. 34, n° 1, p. 109-130.

GOLDSTEIN D.S. (1982), « The Professionalization of History in Britain in the Late Nineteenth and Early Twentieth Centuries », *Storia della Storiografia*, n° 3, p. 3-26.

GRANJOU C. et BARBIER M. (2010), *Métamorphoses de l'expertise. Précaution et maladies à prions*, Paris, Éditions de la Maison des sciences de l'homme ; Versailles, Éditions Quæ.

GRÜNE-YANOFF T. (2011), « Agent-Based Models as Policy Decision Tools : The Case of Smallpox Vaccination », *Simulation & Gaming*, vol. 42, n° 2, p. 225-242.

HABTEMARIAM T., GHARTEY-TAGOE A., ROBNETT V. et TRAMMEL G. (1988), « Computational Epidemiology-New Research Avenues », *Proceedings of the 5th International Symposium on Veterinary Epidemiology and Economics*, p. 84.

- HETHCOTE H.W. (2000), « The Mathematics of Infectious Diseases SIAM Review », vol. 42, n° 4, p. 599-653.
- HINCHLIFFE S. et CRADDOCK S. (2015), « One World One Health ? Social science engagements with the one medicine agenda », *Social Science & Medicine*, n° 129, p. 1-4.
- KECK F. (2010), *Un monde grippé*, Paris, Flammarion.
- KECK F. (2020), Les formes de l'expertise expriment des rapports différents à la nature, *Terra Nova*, 27/04/2020 : <http://tnova.fr/notes/les-formes-de-l-expertise-expriment-des-rapports-differents-a-la-nature>.
- KNORR-CETINA K.D. (1999), *Epistemic Cultures. How the Sciences Make Knowledge*, Cambridge, Harvard University Press.
- KRIEGER N. (2011), *Epidemiology and the People's Health. Theory and Context*, Oxford, Oxford University Press.
- LAKOFF A. (2015), « Global health security and the pathogenic imaginary », dans JASANOFF, S. et KIM, S.-H. (dir.), *Dreamscapes of modernity. Sociotechnical imaginaries and the fabrication of power*, p. 300-320.
- LAKOFF A., et KECK F. (2013), Preface : Sentinel Devices. *Limn*, vol. 1, n° 3 : <https://escholarship.org/uc/item/0xq1t67m>.
- LASCOUMES P. et LE GALÈS P. (2004), *Gouverner par les instruments*, Paris, Sciences Po.
- LETONTURIER É. (dir.) (2012), *Les réseaux*, Paris, CNRS.
- LI VIGNI F. (2020), « Normativité des modèles et régimes du futur. Trois communautés d'anticipation dans les sciences de la complexité », *Revue d'anthropologie des connaissances*, vol. 14, n. 1 : <http://journals.openedition.org/rac/4261>.
- LI VIGNI F. (2021a), « Regimes of evidence in complexity sciences », *Perspectives on science*, vol. 29, n. 1.
- LI VIGNI F. (2021b), « Cinq types de travail scientifique 'interdisciplinaire' », *Natures Sciences Sociétés*, à paraître.
- LUKE D.A. et STAMATAKIS K.A. (2012), « Systems science methods in public health : dynamics, networks, and agents », *Annual review of public health*, vol. 33, n° 1, p. 357-376.
- MARATHÉ M. et VULLIKANTI A.K.S. (2013), « Computational epidemiology », *Communications of the ACM*, vol. 56, n° 7, p. 88-96.
- MNISZEWSKI S., DEL VALLE S., STROUD P. *et al.* (2008), « EpiSimS simulation of a multi-component strategy for pandemic influenza », *Proceedings of the 2008 Spring simulation multiconference*, p. 556-563.

MORAN K.R., FAIRCHILD G., GENEROUS N. *et al.* (2016), « Epidemic Forecasting is Messier Than Weather Forecasting : The Role of Human Behavior and Internet Data Streams in Epidemic Forecast », *The Journal of Infectious Diseases*, vol. 214, n° 4, p. 404-440.

NEWMAN M.E.J., STROGATZ S.H. et WATTS D.J. (2001), « Random graphs with arbitrary degree distributions and their applications », *Physical Review E*, n° 64.

OLIVER N., LETOUZÉ E., STERLY H. *et al.* (2020), « Mobile phone data and COVID-19 : Missing an opportunity ? », preprint arXiv:2003.12347.

OPITZ S. (2017), « Simulating the world : The digital enactment of pandemics as a mode of global self-observation », *European Journal of Social Theory*, vol. 20, n° 3.

PASTOR-SATORRAS R. et VESPIGNANI A. (2001), « Epidemic dynamics and endemic states in complex networks », *Physical Review E*, vol. 63, n° 6.

PESTRE D. (2006), *Introduction aux science studies*, Paris, La Découverte.

PUMAIN D. et SAINT-JULIEN T. (1989), « La dynamique d'un système de villes », *Sistemi Urbani*, 3, p. 325-337.

SALATHÉ M., BENGTSSON L., BODNAR T.J. *et al.* (2012), « Digital Epidemiology », *PLoS Computational Biology*, vol. 8, n° 7.

SALTELLI A., BAMMER G., BRUNO I., CHARTERS E., DI FIORE M., DIDIER E. *et al.* (2020), « Five ways to ensure that models serve society : a manifesto », *Nature*, vol. 582, 2020.

STRAUSS A. (1978), « A social world perspective », *Studies in symbolic interactions*, vol. 2, Greenwich, Jai Press, p. 119-128.

STRAUSS A. (1984), « Social worlds and their segmentation processes », *Studies in symbolic interactions*, vol. 5, Greenwich, Jai Press, p. 123-139.

VARENNE F. et SILBERSTEIN M. (dir.) (2013), *Modéliser & simuler. Épistémologies et pratiques de la modélisation et de la simulation*, tome 1, vol. 1, Paris, Éditions Matériologiques.

VIEILLE-BLANCHARD É. (2007), Croissance ou stabilité ? L'entreprise du Club de Rome et le débat autour des modèles, dans Dahan, A. (dir.), *Les modèles du futur*. Paris, La Découverte, p. 19-43.

WATTS D.J. (2004), « The 'new' science of networks », *Annual Review of Sociology*, n° 30, p. 243-270.

WHITLEY R. (1984), *The intellectual and social organization of the sciences*, Oxford, Clarendon Press.

WOLF M. (2017), « Knowing pandemics : An investigation into the enactment of pandemic influenza preparedness in urban environments », *Science & Technology Studies*, vol. 10, n° 10, p. 1-22.

ZYLBERMAN P. (2013), *Tempêtes microbiennes. Essai sur la politique de sécurité sanitaire dans le monde transatlantique*, Paris, Gallimard.