

compartiments « malades sévères » ou « malades non sévères »...

Récemment, plusieurs équipes ont ainsi proposé leurs SIR améliorés. A l'université de Bâle, l'équipe de Richard Neher utilise sept compartiments, pour simuler l'évolution de la maladie. Il est même possible, au cours du temps, de changer le taux de reproduction, pour réduire la transmission et « voir » l'effet d'un équivalent d'une situation confinée. La technique étant relativement simple à mettre en œuvre, beaucoup de simulateurs sont proposés en ligne, comme celui de l'équipe suisse ou comme ceux d'« amateurs », tel celui de Gabriel Goh, spécialiste d'apprentissage machine, qui, avec onze « curseurs », permet de se faire une idée de la propagation d'une maladie.

#### « Matrices de contact »

Malgré ces raffinements, cela ne suffit pas. Anderson Kendrick et William Kermack avaient prévu : ces modèles ne marchent que pour une population homogène, où tout le monde infecte tout le monde de la même manière. Or, les populations réelles sont hétérogènes, avec des densités différentes sur le territoire et, surtout, n'ont pas le même âge. Un enfant n'a pas la même susceptibilité à une maladie qu'un adulte ou qu'une personne âgée. Il n'a pas non plus le même nombre de contacts quotidiens que ses parents ou grands-parents.

D'où l'idée d'améliorer la description en ajoutant des « compartiments » en classe d'âge, par tranches de cinq ans. Chacun des paramètres précédents aura donc une valeur différente pour chaque tranche. Fort heureusement, de scrupuleux statisticiens ont estimé ces données de contact pour plusieurs pays. En France, par exemple, un enfant de moins de 5 ans a trois fois plus d'interactions quotidiennes avec des enfants de son âge qu'avec des personnes de 30-34 ans. Les adolescents de 15-19 ans sont les plus « tactiles » entre eux, et les Français ont presque deux fois plus de contacts que les Allemands à l'intérieur de cette tranche. « Ces matrices de contact changent la dynamique d'une épidémie », insiste Pascal Crépey, de l'École des hautes études en santé publique, à Rennes. Son modèle, en ligne le 20 mars, tient compte de cet effet et prédit l'engorgement hospitalier actuel en fonction de différents  $R_0$ . Dans l'hypothèse où  $R_0 = 3$ , toutes les régions, d'ici au 15 avril, seraient débordées. La moitié résisterait si  $R_0 = 2,25$ . Et cela sous l'hypothèse, désormais fictive, qu'aucune mesure pour réduire les transmissions n'est prise.

Sa consœur Vittoria Colizza, à l'Inserm, a aussi étudié l'effet de la fermeture des écoles sur la propagation. Car, même si une telle mesure n'avait jamais été prise, il existe des données de « contacts » en période scolaire et en période de vacances (proche d'une situation de fermeture). Le modèle à compartiments, mis en ligne le 14 mars, estimait ainsi une réduction de 10 % du pic épidémique en fermant les écoles.

Même philosophie, publiée dans *The Lancet* le 25 mars, par une équipe de la London School of Economics, à propos de la ville chinoise de Wuhan, épice de l'épidémie. Ce modèle compartimenté prédit qu'une levée des mesures de confinement en avril baisserait de plus de 90 % les cas quotidiens par rapport à une levée en mars.

A force d'aller dans les détails, les chercheurs ont voulu pousser jusqu'au bout et zoomer jusqu'à l'individu lui-même. Pourquoi diviser la population en dix-sept tranches quand les ordinateurs peuvent facilement traiter les situations de chaque cas individuel, fussent-ils des millions ? Cette approche, dite « multi-agent » ou « individu-centrée », a été développée depuis une quinzaine d'années et constitue la seconde grande famille de modèles. Comme pour les modèles SIR, les principes sont assez simples. A chaque individu du modèle sont attachés un âge, un lieu d'habitation, des enfants, un foyer, un lieu de travail... Il peut bouger dans l'espace, contraint par les données connues de mobilité, de densité... Arrive une maladie avec ses propriétés propres de temps d'incubation, d'infection, de contagiosité. Ces deux types d'informations sont mélangés, et la simulation est lancée.

QUELQUES  
DIXIÈMES D'INCERTITUDE  
PEUVENT CHANGER  
DE PLUSIEURS  
MILLIERS UN NOMBRE  
DE CAS

Elle est forcément aléatoire (on met une personne infectée au hasard, les gens bougent de façon erratique...), et elle est reproduite plusieurs centaines de fois, afin d'en tirer des enseignements moyens sur le nombre de nouveaux cas, d'hospitalisation...

A l'Imperial College, l'équipe de Neil Ferguson est experte en la matière depuis sa simulation, présentée en 2005 dans *Nature*, de la grippe H5N1, en Asie du Sud-Est, par ces méthodes. Ces chercheurs l'ont également appliquée au Covid-19 pour mesurer l'effet de différentes restrictions de circulation et inspirer les gouvernements. D'autres l'ont fait à l'échelle de Singapour dans le même but. Comme ils l'expliquaient dans *The Lancet*, le 23 mars, la stratégie la plus efficace, pour réduire de 99 % le nombre d'infections, est la panoplie complète : fermeture des écoles, quarantaine des malades et éloignement du travail.

« Ces simulations sont plus réalistes, mais elles contiennent plus de paramètres et sont difficiles à interpréter », constate M. Cauchemez, qui a travaillé avec M. Ferguson et jongle avec les deux approches. Les approches multi-agents n'ont pas été utilisées en France, car elles n'étaient pas nécessaires pour répondre aux questions posées. » M. Ferguson lui-même, dans le dernier rapport de son équipe, datant du 26 mars, reconnaît que le modèle SIR, qu'il a aussi utilisé, donne les mêmes résultats que ses simulations multi-agents, plus complexes.

En fait, à chaque problème, son modèle. « La règle est qu'on cherche le modèle le plus simple pour répondre à la question posée », résume Laura Temime, du Conservatoire national des arts et métiers. Mais il faut faire vite, car les questions changent avec l'évolution de l'épidémie. Au début, lorsque le virus n'était qu'en Chine, il s'agissait de savoir quelle était la probabilité qu'il débarque en Europe. La réponse est venue de M<sup>me</sup> Colizza qui a travaillé sans SIR ou multi-agent, « juste » en analysant les flux aériens entre pays et à l'intérieur de la Chine. Puis les statisticiens se sont abîmés les yeux sur les cas chinois pour estimer le fameux  $R_0$ , tandis que leurs collègues, sur le terrain, traquaient les patients atteints pour remonter la chaîne de contamination et identifier deux autres paramètres-clés, le taux de mortalité et le temps de génération (grosso modo le temps entre l'apparition des symptômes chez le premier et le second contaminé).

Ensuite, les modèles à compartiments chauffent pour anticiper la dynamique et les saturations des services de santé. Et très vite, les mêmes ou la version multi-agent tournent pour estimer l'effet de diverses mesures (isolement des cas, quarantaines, fermeture des écoles, arrêt de travail, confinement strict...).

#### Barre d'erreurs

« Et maintenant, on veut savoir quoi faire après le confinement en étudiant diverses options », note M. Cauchemez, qui pense que le conseil scientifique devrait faire des recommandations cette semaine. Mais ce confinement est une situation inédite, et nous manquons forcément de données pour alimenter les modèles. » Les opérateurs téléphoniques pourraient être un recours. Orange a annoncé, le 27 mars, avoir passé un accord avec l'Inserm et l'équipe de M<sup>me</sup> Colizza pour utiliser les données téléphoniques, afin d'évaluer la mobilité en temps normal et en temps confiné.

« Le problème, ce n'est pas les modèles, mais leurs hypothèses et les données qui les nourrissent », indique M. Crépey, en écho au célèbre adage des statisticiens. « Tous les modèles sont faux, mais quelques-uns sont utiles », ajoute-t-il. Le Covid-19 n'échappe pas à la règle. Quel est le taux de mortalité ? Quelle est la part des asymptomatiques contagieux et avec quelle efficacité transmettent-ils le virus ? Le virus pourrait-il muter ?

Pour ces raisons, chaque simulation est assortie non seulement de la traditionnelle barre d'erreurs, mais aussi d'une analyse de sensibilité des résultats aux fluctuations des divers paramètres utilisés. Quelques dixièmes d'incertitude peuvent changer de plusieurs milliers un nombre de cas. « Les simulations sont à manier avec précaution en termes de communication », résume M. Boëlle. En outre, les prédictions initiales, où « on ne fait rien », sont souvent démenties avec le temps, car les gens changent leurs pratiques devant le risque.

Cependant, les spécialistes se risquent à une prévision. La fin d'un confinement causera un rebond de la courbe épidémique, car il n'y aura pas eu assez de « contaminés », donc « d'immunisés ». Comme le bon vieux modèle de 1927 le laisse entendre... ■

DAVID LAROUSSIERE

## La NASA en état d'urgence

L'agence spatiale américaine met les bouchées doubles pour assurer l'envol en juillet de la mission Mars 2020

Dans les « salles blanches » de la NASA, là où sont assemblés les engins que l'agence américaine lance dans l'espace, les équipes se soumettent à des exigences sanitaires draconiennes : charlotte sur la tête, blouse, gants, surchaussures et, bien sûr, masque sur le visage. Ainsi que le résume Sylvestre Maurice, de l'Institut de recherche en astrophysique et planétologie (université de Toulouse-CNRS-Centre national d'études spatiales), « cela fait trente ans que je collabore avec la NASA, je n'ai jamais vu quelqu'un mettre un postillon sur un rover ». Hors de question qu'une machine comme le rover Perseverance de la mission Mars 2020, qui doit bientôt partir à la recherche de traces de vie passée sur la Planète rouge, soit polluée par de la matière organique emportée depuis la Terre. Le coronavirus n'est donc pour rien dans ce luxe de précautions.

Pourtant, c'est lui qui pourrait bien empêcher cette mission à deux milliards de dollars de décoller en juillet de Cap Canaveral (Floride), ce qui aurait pour effet de transformer Mars 2020 en Mars 2022 car, pour des raisons d'alignement planétaire, la fenêtre de tir pour Mars ne s'ouvre que tous les vingt-six mois. La formidable organisation de la NASA est en effet mise à l'épreuve par la montée en puissance du Covid-19 aux Etats-Unis.

« La priorité des priorités de la NASA, c'est la santé des gens qui travaillent pour elle », explique Sylvestre Maurice. L'agence est donc en train d'effectuer des choix stratégiques dans ses programmes pour préserver le plus urgent, à savoir Mars 2020. Jeudi 19 mars, Jim Bridenstine, l'administrateur de la NASA, a ainsi annoncé l'arrêt des activités dans le centre spatial John C. Stennis (Mississippi), où sont testés les moteurs de fusées, et sur le site d'assemblage de Michoud (Louisiane). Le développement et la fabrication du Space Launch System – le plus gros lanceur de la NASA – et de la capsule habitée Orion sont stoppés. Ces deux éléments constituant le cœur du projet américain de retour sur la Lune, celui-ci est de fait mis entre parenthèses.

Vendredi 20 mars, la NASA a de nouveau réduit la voilure en annonçant la suspension des travaux sur le James Webb Space Telescope (JWST), le successeur du célèbre mais vieillissant Hubble. Projet d'une complexité folle, ce télescope spatial de dix milliards de dollars est actuellement en cours de montage final et de tests en Californie, un Etat particulièrement touché par l'épidémie qui sévit sur le sol américain. Ayant explosé les budgets et les calendriers (il était censé

s'envoler en... 2007), le JWST peut prendre encore un peu de retard, d'autant qu'il doit partir en 2021.

Dans les grandes missions en cours de préparation, reste donc Mars 2020 qui va concentrer l'attention de la NASA au cours des prochaines semaines. Tous ses éléments ont été acheminés au centre spatial Kennedy, à Cap Canaveral. C'est à un subtil jeu de Meccano auquel les ingénieurs et techniciens vont désormais se livrer. Le rover Perseverance, grosse bête de plus d'une tonne, doit d'abord être « accouplé », selon l'expression de Sylvestre Maurice, à l'étage de descente, lequel a pour mission, lors de la phase d'atterrissage, de se maintenir en suspension dans l'air grâce à des rétrofusées et d'hélicoptère le robot mobile pour le déposer en douceur sur le sol. Ce duo sera ensuite encapsulé dans un cocon composé, à l'avant, d'un bouclier thermique qui protégera Perseverance lors de l'entrée dans l'atmosphère martienne, et d'une coque à l'arrière. Le tout, enfin, sera arrimé au module de croisière qui assurera le voyage de sept mois vers Mars, où la mission est supposée arriver le 18 février 2021.

#### « Des monstres d'organisation »

Toute cette phase d'assemblage est programmée pour les mois d'avril, mai et juin. « Nous avons tenu tous les plannings depuis cinq ans. Nous sommes à moins de quatre mois du but, un décollage le 17 juillet », récapitule Sylvestre Maurice, qui, face à la déferlante du Covid-19, sait que les marges de manœuvre sont très étroites, mais se rassure en disant que « les gens de la NASA sont des monstres d'organisation en temps de crise... ».

L'agence américaine a un motif de pression autre que le coronavirus : la concurrence. Si les Européens, alliés aux Russes, ont déjà jeté l'éponge le 12 mars, en reportant à 2022 leur mission ExoMars, handicapée par différents problèmes techniques, ce n'est pas le cas des Chinois, qui comptent bien faire décoller le 23 juillet Huoxing-1, très ambitieux projet martien qui cumule orbiteur, atterrisseur et petit rover.

Spécialiste du spatial chinois auquel il a consacré plusieurs livres, Philippe Coué explique que, même si la Chine a vu démarrer sur son sol la pandémie et a été paralysée pendant de nombreuses semaines, « l'activité spatiale ne s'y est jamais arrêtée. Au contraire, les Chinois veulent montrer au monde qu'ils ont réussi à s'en sortir tout seuls et vite. Plus que jamais, ils mettent la pression sur les Américains en leur disant "Nous, on fait quand même" ». ■

PIERRE BARTHÉLÉMY



### CARTE BLANCHE

## Le confinement scientifique, un vieux débat

Par STÉPHANE VAN DAMME

Alors que les autorités sanitaires dans toute l'Europe ont déclaré l'état de confinement à la maison et que l'on en appelle, dans les universités et dans les unités de recherche, à généraliser le télétravail, le coronavirus parachèverait-il la dématérialisation de la recherche en réseau ? A cette occasion, une vieille tension refait surface entre deux représentations légitimes du travail scientifique : l'une, majoritairement collective, valorise le travail en équipe lié à de grandes infrastructures ; l'autre, plus solitaire, renoue avec une vieille conception du confinement, sur le modèle de la retraite spirituelle. Cette dernière a souvent été associée à la figure solitaire du génie scientifique.

Ainsi, lorsque l'on évoque l'astrophysicien Stephen Hawking, on aime à célébrer cette particularité de la créativité scientifique. Sa maladie lui ayant fait perdre l'usage de son corps, Hawking représenterait l'esprit désincarné, le confinement le plus absolu, source d'innovation. Le travail scientifique chez Hawking s'apparentait à une pure opération mentale et cognitive. Pourtant, comme nous le rappelle le livre de l'anthropologue Hélène Mialet *A la recherche de Stephen Hawking* (Odile Jacob, 2017), c'est faire disparaître un peu vite l'entourage du célèbre chercheur. Lourdemment appareillé et

aidé par de nombreux assistants, Hawking était en fait au sommet d'un système de cognition distribuée. Au-delà de ce cas limite, il faut rappeler que le modèle du retrait du monde a été progressivement stigmatisé. Dès le siècle des Lumières foisonnèrent des mises en garde médicales contre un abus de la lecture ou du travail savant solitaire.

#### Travailleurs intellectuels

Le docteur Samuel Auguste Tissot (1728-1797), dans son ouvrage *De la santé des gens de lettres*, avait élaboré un ensemble de prescriptions pour éviter aux savants de sombrer dans les pathologies intellectuelles habituelles de l'obsession érudite. Savants que Tissot compare aux « fakirs des Indes » : « Comme eux, ils se séparent du genre humain ; comme eux, ils se moquent de plein gré sans que souvent il en revienne le plus léger avantage à la société. »

L'organisation des sciences au XX<sup>e</sup> siècle a même rapproché le monde scientifique de l'usine, puis de l'entreprise, voire plus récemment de la start-up, sensible aux évolutions de la culture managériale. Il y a deux ans, alors que l'on célébrait l'anniversaire de Mai 68, une websérie produite par l'Inserm, *Mai 68. La science s'affiche*, racontait comment le personnel scientifique avait participé activement aux « événements ». A travers portraits et en-

tretiens, les scientifiques y apparaissent sensibles aussi bien à la puissance du mandarinate et du paternalisme, à la hiérarchie des rapports hommes-femmes, qu'à l'amélioration des conditions de travail dans les laboratoires. Au-delà de l'engagement politique, la série montrait l'importance, dans les luttes des années 1960 et 1970, de l'identification, du laboratoire à l'usine, nous rappelant le projet de la CGT, après 1918 de créer une confédération des travailleurs intellectuels.

Dans son livre *Une histoire émotionnelle des savoirs*. (CNRS Editions, 2019), Françoise Waquet souligne que, paradoxalement, l'acceptation de la subjectivité du chercheur, aujourd'hui, se fait, alors que son bien-être cesse d'être un discours personnel pour devenir un sujet de la médecine du travail. Les enquêtes réalisées auprès des personnels dans les délégations du CNRS révèlent l'augmentation de ces souffrances liées au travail collectif, mettant en évidence, aussi bien dans les corps que dans les esprits, la pression, le stress, l'absence de reconnaissance, etc. Alors, le confinement n'est-il pas l'occasion rêvée pour réfléchir à cette organisation du travail scientifique ? ■

Stéphane Van Damme, professeur d'histoire des sciences à l'Institut universitaire européen (Florence)