

un modèle de croissance exponentielle, comme début mars 2020. Plus on a de données, plus on peut affiner les modèles. Et, dans tous les pays, on a observé un développement considérable de l'acquisition des données de suivi de l'épidémie.

De plus, jamais auparavant la modélisation en épidémiologie n'avait eu un tel impact politique et médiatique. Dans la plupart des pays européens, les premiers confinements nationaux ont été décidés sur la base de modèles mathématiques ou informatiques. Certes, on était dans une situation inédite où le poids du biologique s'imposait de manière historiquement forte pour les pays occidentaux. Il n'en reste pas moins que ce constat provenait de modèles, ce qui était complètement nouveau.

Par ailleurs, la modélisation en épidémiologie est une science en constante évolution. Par exemple, certains outils couramment utilisés sont assez récents. Notamment, la technique dite «d'EpiEstim» pour estimer au mieux le R_0 , le nombre moyen de personnes infectées par une personne porteuse de l'infection, a été développée par Anne Cori, chercheuse à l'Imperial College de Londres, lors de l'épidémie d'Ebola en 2014. Les modèles, même ceux purement analytiques, changent aussi.

On a aussi utilisé des outils théoriques récents qui avaient principalement été testés rétrospectivement, sur des épidémies passées. C'est le cas pour la phylodynamique, qui consiste à analyser les séquences génétiques des virus afin de comprendre l'histoire des épidémies. Car la manière dont les microbes se propagent laisse des traces dans leurs génomes. C'est un champ très jeune, dont les outils les plus populaires ont moins de dix ans. Le terme lui-même ne date que de 2004. La phylodynamique existe à peine en France, mais nous montons justement un groupement de recherche avec le CNRS et l'Inrae pour la développer. Les Britanniques, en revanche, sont bien avancés dans le domaine, ce qui explique leur avance considérable en termes de séquençage et de génomique.

Quels sont les grands enjeux de la modélisation des épidémies, à présent ?

Aujourd'hui, on comprend bien la dynamique hospitalière. On sait assez bien la modéliser pour peu qu'il n'y ait pas de changement brusque de politique de santé publique. Les principaux enjeux sont les inconnues biologiques que sont l'évolution virale et l'efficacité de la réponse immunitaire. Dans l'équipe, en ce moment, nous essayons de développer des modèles mathématiques avec des formalismes dits «d'équation aux dérivées partielles» qui, justement, capturent mieux les variations d'immunité, car pour l'instant les hypothèses à ce sujet sont un peu simplistes: on suppose soit

que la personne est vaccinée soit qu'elle a été infectée, a guéri et est immunisée.

Un autre défi qui intéresse beaucoup la communauté est l'intégration des données dans les modèles statistiques: pour l'instant, en France, les modèles de description de l'épidémie s'appuient sur des données classiques (incidence de la maladie à l'hôpital, dépistage...). Le pays s'est mis doucement au séquençage des virus chez les personnes infectées par le SARS-CoV-2 afin de détecter les mutations associées aux variants, mais on n'injecte pas encore ces données dans les modèles, contrairement à d'autres pays comme le Royaume-Uni. On pourrait rajouter à cela les données de mobilité et les données environnementales, sachant que l'hétérogénéité géographique est encore difficile à suivre.

Mais la principale inconnue est probablement sociale. On ne se pose pas les mêmes questions de modélisation si on se lance massivement dans la prévention par des mesures sanitaires, si au contraire on restructure les capacités hospitalières pour augmenter les admissions en réanimation par an, ou si on table sur une troisième dose vaccinale pour augmenter l'immunité.

Et concernant les autres maladies ?

Pour le moment, les quelques modélisateurs en France commencent tout juste à se remettre de l'effort collectif produit en 2020 et 2021. Mais il y aura des ponts, c'est certain. Par exemple, l'approche de simulation sur OpenStreetMap, d'Olivier Thomine, pourra très clairement être transposée à d'autres maladies respiratoires, comme la grippe, voire à la transmission de maladies par des vecteurs comme le moustique-tigre. En fait, la modélisation des épidémies se nourrit en permanence des nouvelles approches. Là encore, les Britanniques ont de l'avance. Ils ont déjà commencé, *via* des numéros spéciaux de revues scientifiques, une rétrospective des approches des différentes équipes pour stimuler le dialogue et tirer les bilans sur l'épidémie actuelle. En France, la nouvelle agence ANRS-MIE tente d'impulser cela pour les maladies humaines en regroupant une trentaine de modélisateurs en épidémiologie, mais les moyens alloués sont dérisoires par rapport aux Anglo-Saxons.

Cela dit, un enseignement est déjà clair. L'interdisciplinarité est un élément crucial en épidémiologie: il est indispensable de maîtriser biologie, physique et enjeux sociaux. Cela illustre, en somme, ce que devrait être la santé publique: une institution profondément interdisciplinaire prenant en compte les différentes composantes de la santé, de l'individu aux populations.

**Propos recueillis par
Marie-Neige Cordonnier**

BIBLIOGRAPHIE

C. Selinger *et al.*, **Predicting Covid-19 incidence in French hospitals using human contact network analytics**, *Int. J. Infect. Dis.*, vol. 111, pp. 100-107, 2021.

M. T. Sofonea *et al.*, **Memory is key in capturing Covid-19 epidemiological dynamics**, *Epidemics*, vol. 35, article 100 459, 2021.

M. T. Sofonea et S. Alizon, **Anticipating COVID-19 intensive care unit capacity strain : A look back at epidemiological projections in France**, *Anaesth. Crit. Care Pain Med.*, vol. 40(4), article 100 943, 2021.

G. Danesh *et al.*, **Quantifying transmission dynamics of acute hepatitis C virus infections in a heterogeneous population using sequence data**, *Plos Pathog.*, vol. 17(9), article e100 9916, 2021.

L'AUTRICE



KELSEY HOUSTON-EDWARDS
mathématicienne et journaliste
aux États-Unis

L'ESSENTIEL

> La connectivité dans un réseau est une propriété essentielle. Elle est définie par les liens entre les éléments du réseau.

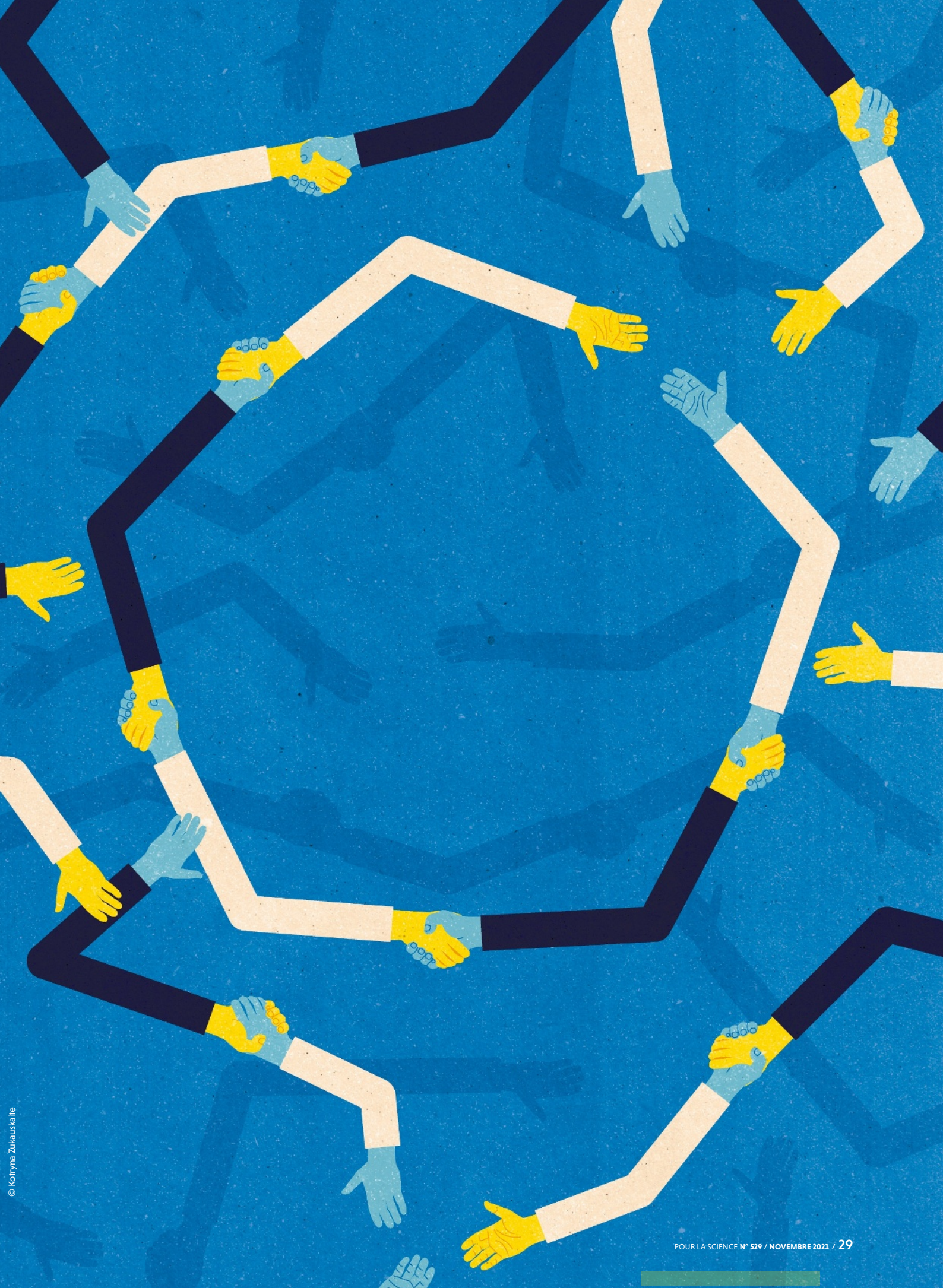
> Lorsqu'il y a suffisamment de liens, il y a « percolation » : il existe alors un chemin de connexions allant d'une extrémité à l'autre du réseau.

> La percolation apparaît en général subitement dès que la proportion de liens dépasse un certain seuil.

> La théorie de la percolation aide à étudier des réseaux de types divers, ordonnés ou non, dont les éléments (les nœuds) peuvent être fixes ou mobiles.

La percolation un outil pour modéliser les réseaux

Inspirée à l'origine par des questions de physique, la théorie de la percolation permet d'étudier certaines propriétés des réseaux. Elle aide notamment à comprendre la propagation des épidémies, à concevoir un réseau de communication décentralisé ou à caractériser la diffusion des informations au sein d'un réseau social.



Quand vous appuyez sur «envoyer» après avoir rédigé un texto, il est facile de s'imaginer que le message va aller directement de votre téléphone à celui de votre ami(e). En réalité, il parcourt généralement un long trajet à travers le réseau cellulaire ou internet, qui sont des infrastructures susceptibles d'être endommagées par des catastrophes naturelles ou contrôlées par des États répressifs. Craignant la surveillance ou l'interférence de l'État chinois, les manifestants technophiles de Hong Kong avaient ainsi préféré éviter internet et utiliser des logiciels tels que FireChat et Bridgefy pour s'envoyer des messages directement par sauts de puce entre téléphones voisins.

Ces applications permettaient de faire passer discrètement un message de proche en proche jusqu'au téléphone du destinataire, qui était le seul à pouvoir visualiser le message. Un

tel ensemble de téléphones liés, appelé «réseau maillé» ou «réseau spécial mobile» (RSM), permet un mode de communication flexible et décentralisé. Cependant, pour que deux téléphones donnés communiquent, ils doivent être liés par une chaîne d'autres téléphones. Combien de personnes dispersées dans Hong Kong doivent être connectées par le même réseau maillé pour avoir l'assurance que la communication à travers la ville est possible?

UN CHANGEMENT ABRUPT

Une branche des mathématiques, la «théorie de la percolation», offre une réponse étonnante: quelques personnes peuvent faire toute la différence. À mesure que des utilisateurs rejoignent le réseau, des poches isolées de téléphones connectés apparaissent peu à peu. Mais une communication complète d'est en ouest ou du nord au sud apparaît tout à coup quand la densité d'utilisateurs dépasse un seuil bien précis. Ce changement rapide de la connectivité d'un réseau correspond à ce que les physiciens appellent une «transition de phase», le même concept que celui utilisé pour décrire des changements abrupts de l'état d'un matériau, comme la fusion de la glace ou l'ébullition de l'eau.

La théorie de la percolation examine les conséquences de la création ou de la suppression aléatoires de liens dans ces réseaux, que les mathématiciens conçoivent comme un ensemble de nœuds (représentés par des points) reliés par des «arêtes» (des traits). Chaque nœud représente un objet tel qu'un téléphone ou une personne, et les arêtes représentent une relation donnée entre deux de ces éléments. L'idée fondamentale de la théorie de la percolation, qui date des années 1950, est que quand le nombre de liens d'un réseau augmente progressivement, un amas global de nœuds connectés va émerger subitement.

À quel moment cette transition a-t-elle lieu? Telle est la question avec laquelle les scientifiques sont aux prises. Quel est l'équivalent, pour un réseau donné, du 0 °C qui voit fondre la glace, ou des 100 °C pour lesquels l'eau bout? À quel point un mème devient-il viral, un produit domine-t-il le marché, un séisme survient-il, un réseau de téléphones portables atteint-il une totale connectivité ou une maladie devient-elle une pandémie? La théorie de la percolation permet de mieux comprendre toutes ces transitions.

Les mathématiciens étudient généralement des réseaux idéalisés, géométriquement symétriques et d'extension infinie, parce qu'ils se prêtent mieux aux calculs théoriques. Les réseaux infinis sont généralement les seuls présentant des transitions de phase véritablement abruptes. Les réseaux réels ont une étendue limitée, sont souvent désordonnés et exigent

Communication dans un réseau maillé

