

relativement simple s'il y avait une relation linéaire entre puissance et connectivité, si chaque petite augmentation de puissance amenait une petite augmentation proportionnelle de la connectivité. Mais l'existence d'un seuil de percolation signifie qu'il y a un risque que le réseau perde soudainement sa connectivité si les utilisateurs se déplacent. La puissance optimale est celle qui garantit que le réseau soit toujours connecté, mais sans gaspiller d'énergie.

L'autre « bouton » est la densité de téléphones. Les réseaux maillés à portée fixe ont besoin d'une densité critique d'utilisateurs, et ont de meilleures chances de permettre une connectivité étendue lors d'événements rassemblant beaucoup de monde, comme un festival de musique, un match de foot ou une grande manifestation.

Jorge Rios, PDG et cofondateur de Bridgefy, indique ainsi que son entreprise a observé des pics importants de nouveaux utilisateurs au Cachemire, au Nigeria, à Hong Kong et en Iran durant les périodes de troubles civils, quand les gens se sont tournés vers les réseaux maillés pour maintenir les communications au cas où le gouvernement couperait internet ou la foule saturerait les connexions cellulaires. Certains quartiers, comme Red Hook à Brooklyn, à New York, utilisent des réseaux maillés pour étendre l'accès à internet en installant des nœuds permanents au sommet des bâtiments. Une bonne partie du matériel nécessaire et de la technologie d'acheminement est encore en pleine évolution, mais on imagine aisément des applications futuristes audacieuses : par exemple, des véhicules autonomes pourraient communiquer directement, afin de partager de l'information sur le trafic ou les dangers de la route, sans nécessiter d'infrastructure supplémentaire.

RÉSEAUX ÉPIDÉMIQUES

Les réseaux utilisés pour modéliser l'écoulement d'un fluide dans une roche ou les communications directes entre téléphones reproduisent la structure spatiale de ces systèmes : deux nœuds sont connectés par une arête si les objets qu'ils représentent sont proches l'un de l'autre dans l'espace physique. Mais pour des réseaux qui suivent la propagation d'une maladie contagieuse d'un individu à l'autre, les liens sont aussi déterminés par la manière dont l'agent pathogène se transmet. Ces réseaux sont particulièrement enchevêtrés : une personne infectée qui passe une heure dans une boîte de nuit peut passer un virus à une autre personne qui va dans les jours suivants le transporter à l'autre bout du pays, ou même sur un autre continent.

Les modèles épidémiologiques les plus simples classent tous les individus en trois catégories (réceptifs, infectés et rétablis) et négligent cette structure complexe des connexions. Dans ces modèles, les personnes

infectées transmettent la maladie à des personnes aléatoires de la catégorie réceptive, avec l'hypothèse que tous les individus de ce groupe (étudiants d'une résidence universitaire, habitants d'une ville...) ont le même risque d'être contaminés. Le taux de nouvelles infections des personnes réceptives dépend du taux de reproduction de base, c'est-à-dire du nombre moyen d'infections secondaires créées par une personne contagieuse, abrégé en R_0 . Si R_0 est supérieur à 1, alors le virus gagne du terrain ; si ce nombre est inférieur à 1, l'épidémie régresse.

La structure d'un réseau épidémique dépend beaucoup de la maladie considérée

Cependant, en pratique, la façon dont les gens interagissent influe sur la propagation globale de la maladie. Par exemple, en 2003, l'épidémie de SRAS (syndrome respiratoire aigu sévère) avait initialement des valeurs de R_0 comprises entre 2,2 et 3,6, mais le nombre de cas sur cette période était « beaucoup plus bas qu'attendu sur la base d'un calcul simple », écrivait en 2006 Lauren Meyers, qui dirige aujourd'hui le Consortium de modélisation du Covid-19 à l'université du Texas.

Ce désaccord serait dû, selon elle, à l'hypothèse que « tous les individus réceptifs ont le même risque d'être infectés », hypothèse qui ignore la forme complexe des réseaux de contacts des personnes. En particulier, les valeurs de R_0 estimées pour le SRAS étaient fondées sur sa propagation rapide au sein d'immeubles d'habitation et d'hôpitaux, qui présentent des « taux particulièrement élevés de contacts rapprochés entre individus » par rapport à la population générale. Mais parce que les personnes infectées par le SRAS tombaient malades assez rapidement, elles étaient hospitalisées avant d'avoir pu infecter beaucoup de personnes.

Les arêtes d'un réseau épidémique expriment des relations particulières. Dans un réseau montrant la propagation potentielle du virus du sida, par exemple, deux personnes sont connectées par une arête si elles ont échangé des fluides corporels. Un réseau montrant la propagation potentielle du Covid-19 a une structure d'arêtes très différente, qui représente les contacts

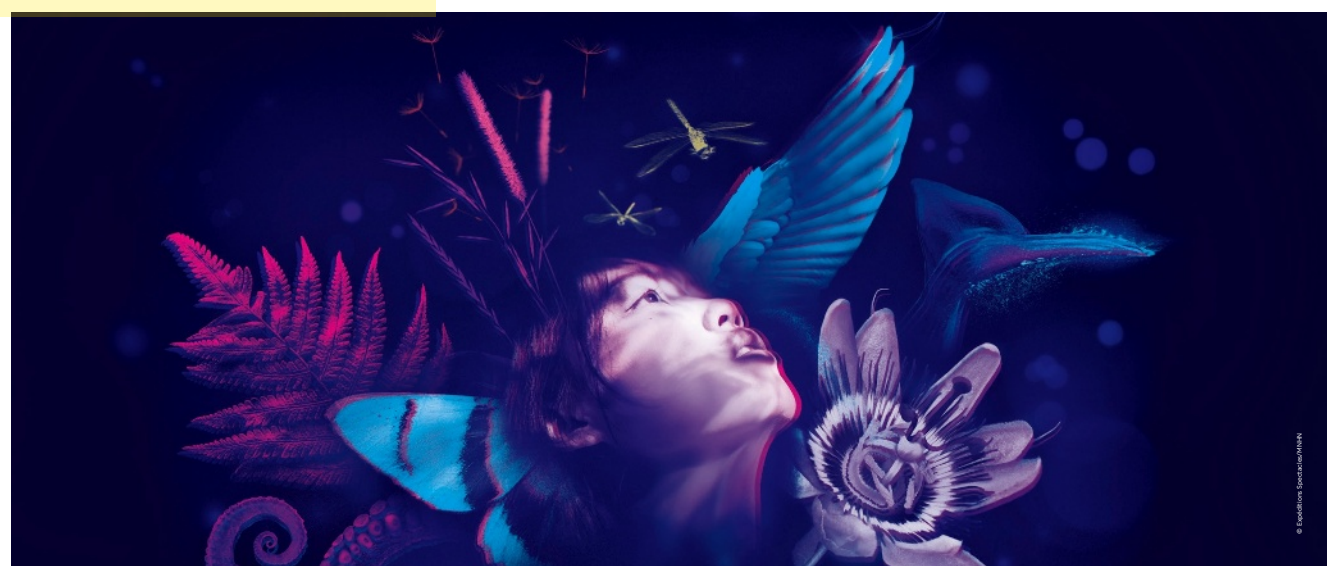
rapprochés sans protection respiratoire. Les confinements ou les restrictions telles que la fermeture des commerces non essentiels et la limitation des voyages modifient cette structure des arêtes et, avec les masques et la distanciation physique, empêchent le virus de «sauter» d'une personne (ou nœud) à une autre. L'un des défis pour les épidémiologistes est de trouver des moyens de réduire suffisamment la connectivité du réseau.

Les réseaux épidémiques réels tels que ceux liés à la propagation du Covid-19 sont extrêmement complexes et difficiles à décrire avec précision. Même si l'on connaissait la structure exacte du réseau, il serait compliqué de l'analyser mathématiquement. On effectue alors des simulations numériques et des analyses massives de données pour prédire les nombres de cas futurs, évaluer l'impact d'une distanciation physique d'un mètre plutôt que de deux, quantifier le rôle des écoles et des restaurants dans la propagation du coronavirus, etc. Alessandro Vespignani, théoricien des réseaux complexes à l'université Northeastern (à Boston, dans le Massachusetts), qualifie ces recherches de «travaux de temps de guerre»: des travaux tactiques et parfois un peu brouillons, mais qui produisent les résultats numériques immédiats dont ont besoin les autorités et les services médicaux.

Par contraste, Alessandro Vespignani mène aussi des recherches «de temps de paix», lorsqu'il a le loisir de «développer le modèle, de calibrer différentes façons de modéliser les choses, de développer des approches scientifiques, de chercher comment améliorer les résultats». Afin d'arriver à une compréhension théorique de la manière dont la forme de base et les caractéristiques structurelles d'un réseau ont un impact sur la propagation d'une maladie, les scientifiques se tournent vers la théorie de la percolation.

DANS UN RÉSEAU ÉPIDÉMIQUE, LE DEGRÉ VARIE BEAUCOUP

Les premiers outils de la percolation, développés avec des mathématiques pratiquées avec «un crayon et du papier», ne sont utilisables que dans les cas les plus simples, quand le réseau est artificiellement ordonné et symétrique. Mais malgré tout, «les mathématiques sont cruciales pour guider notre compréhension», note Alessandro Vespignani. Les épidémiologistes des réseaux réduisent le réseau à ses caractéristiques essentielles, en particulier sa distribution des degrés des nœuds. Le degré d'un nœud est le nombre d'autres nœuds auxquels il est relié. Dans le réseau carré, par exemple, tous les nœuds





SENSORY
OdySeY

L'ODYSSÉE SENSORIELLE

Exposition
23 octobre 2021 -
4 juillet 2022

**GRANDE GALERIE
DE L'ÉVOLUTION**

Jardin des Plantes
Paris 5^e
#OdysséeSensorielle

**Pour la
Science**