

sont de degré 4. Mais dans un réseau épidémique, le degré varie énormément, car certains individus ont de nombreux contacts et peuvent potentiellement contaminer de nombreuses autres personnes, tandis que d'autres individus sont pratiquement isolés.

TESTER L'INFLUENCE DES DEGRÉS

La distribution des degrés est spécifiée par la probabilité pour chaque nœud d'avoir tel ou tel degré. Dans les réseaux de contacts épidémiques, cela se traduit par la probabilité que quelqu'un contamine (ou soit potentiellement infecté par) un certain nombre d'autres personnes. Pour comprendre comment cet aspect joue sur le seuil de percolation, les épidémiologistes modélisateurs comme Lauren Meyers génèrent des milliers de réseaux échantillons qui sont, pour l'essentiel, aléatoires, hormis une caractéristique: ils ont tous la même distribution des degrés. Cette approche est une façon d'isoler la distribution des degrés afin de percevoir son rôle dans la structure du réseau. Si les propriétés des réseaux générés correspondent à celles des réseaux réels, alors la distribution des degrés ou toute autre caractéristique qui est intégrée au modèle sont probablement pertinentes pour la propagation de la maladie, explique Lauren Meyers. Si la correspondance est parfaite, «alors vos résultats mathématiques auraient exactement la même allure que vos simulations».

Les recherches montrent que le seuil de percolation pour un réseau chute si le réseau a une distribution des degrés plus étalée, ce qui signifie une plus large fourchette des degrés des différents nœuds. Ainsi, une maladie se propagera plus facilement dans un réseau comportant des individus très connectés et des personnes isolées que dans un réseau où tout le monde a à peu près le même nombre de contacts. Joel Miller, mathématicien épidémiologiste à l'université La Trobe, à Melbourne, en Australie, explique cette observation de façon heuristique: «Si j'ai dix fois plus de contacts que vous, j'ai dix fois plus de chances d'être infecté, et j'ai dix fois plus de chances d'infecter quelqu'un que vous, mon rôle est cent fois plus important dans la transmission de la maladie.»

La théorie de la percolation sert à modéliser d'autres phénomènes de «contagion», comme quand sur les réseaux sociaux d'internet un même gagne lentement des vues et des partages avant de brutalement devenir viral. Elle peut s'appliquer aux modèles économiques pour montrer comment un produit particulier peut rapidement devenir dominant sur le marché quand suffisamment de consommateurs l'ont recommandé à leurs contacts. Les modèles électoraux, qui décrivent l'influence des personnes sur leur communauté, présentent également des effets de seuil.

Contrairement aux réseaux infinis et bien ordonnés que les mathématiciens étudient classiquement, les réseaux dérivés d'exemples réels sont de taille finie et désordonnés. Les réseaux finis ne passent pas instantanément de liens restreints à de petites poches à une connexion généralisée à la manière des réseaux infinis; néanmoins, la transition est le plus souvent très rapide. Pour comprendre ces processus, les théoriciens des réseaux font des allers et retours entre les mathématiques et les simulations numériques. Les réseaux simples les guident pour construire des modèles numériques détaillés de réseaux réels, et les leçons qu'ils tirent de ces simulations influent à leur tour sur la manière dont ils modifient les modèles papier-crayon pour mieux comprendre le monde réel.

LA PANDÉMIE DÉPEND DE PLUSIEURS RÉSEAUX

De nombreux modèles importants de la propagation du Covid-19 intègrent des informations d'autres réseaux. Les systèmes scolaires, les itinéraires des trains, les emplois du temps du personnel hospitalier, etc. forment tous des réseaux, et chacun d'eux a une influence sur le cours de la pandémie. «Nous vivons dans ce système de réseaux interdépendants, et nous ne pouvons tout simplement pas réfléchir à l'un sans comprendre les conséquences que les autres ont dessus», commente Raissa D'Souza, théoricienne des réseaux complexes à l'université de Californie à Davis. Chaque réseau est un système complexe ayant son propre comportement émergent. De plus en plus, les spécialistes couplent ces réseaux pour créer des systèmes encore plus complexes. Mais il n'y a pas de cadre théorique clair pour étudier ces réseaux de réseaux. Comprendre comment leurs propriétés sont affectées par les propriétés des réseaux qui les constituent est l'un des défis de demain.

«Nous ne vivons ni dans une bulle ni dans un monde où tout se mélange. Nous vivons dans un monde avec des contacts, nous suivons des comptes Twitter, et c'est là par exemple que la percolation et d'autres modèles entrent en scène», dit Alessandro Vespignani. Parvenir maintenant à une meilleure compréhension de ces modèles mathématiques «peut faire la différence à l'avenir». Les réseaux de percolation sont facilement adaptables et offrent aux mathématiciens de nouveaux terrains de jeu et aux scientifiques des applications pratiques. Mais aussi divers soient-ils, ces modèles sont unis par une caractéristique étonnante: ils ont tous un point de bascule très abrupt, où l'ajout de quelques connexions a pour effet de relier d'un seul coup l'ensemble du réseau. À mesure que le monde devient plus connecté, la nécessité de comprendre ces transitions cruciales se fait plus urgente. ■

BIBLIOGRAPHIE

M. Li et al., **Percolation on complex networks : Theory and application**, *Physics Reports*, vol. 907, pp. 1-68, 2021.

R. M. Ziff, **Percolation and the pandemic**, *Physica A*, vol. 568, article 125723, 2021.

F. Bagnoli et al., **Percolation and internet science**, *Future Internet*, vol. 11(2), article 35, 2019.

H. Duminil-Copin, **La percolation, un jeu de pavages aléatoires**, *Pour la Science*, n° 407, pp. 48-54, septembre 2011.

Pour une reforestation raisonnée

Restaurer des milieux forestiers dégradés ne se résume pas à planter des arbres. Et ne s'improvise pas... Pour lutter contre le déclin de la biodiversité et le réchauffement climatique, mieux vaut s'appuyer sur l'expérience acquise ces dernières décennies.



L'ESSENTIEL

> Chaque année, 10 millions d'hectares de forêt (notamment dans les milieux tropicaux) sont détruits sous la pression de l'agriculture, l'élevage ou l'exploitation du bois.

> Or les forêts sont un réservoir important de la biodiversité terrestre, ainsi que des puits de carbone considérables.

> Différentes stratégies de reforestation sont possibles, naturelles ou assistées. Une analyse méticuleuse de la situation locale est impérative pour mener à bien ces projets.

> L'expertise acquise lors de la reforestation pourrait servir dans l'industrie du bois afin de limiter l'impact négatif de ces plantations, ou dans les plans d'urbanisme pour créer des îlots de fraîcheur.

LES AUTEURS



ÉLISE BUISSON
maîtresse de conférences à l'IMBE (Institut méditerranéen de biodiversité et d'écologie marine et continentale) et Avignon Université (CNRS, IRD)



MARIE ANGE NGO BIENG
chercheuse au Cirad (Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement) et au Catie (Centro agronómico tropical de investigación y enseñanza) à Turrialba, Costa Rica



THIERRY GAUQUELIN
professeur émérite à l'IMBE et Aix-Marseille Université (CNRS, IRD)



Dans cette pépinière, les semis sont préparés avant d'être installés en vue de la restauration d'une ancienne zone forestière.

Lors de sa création en 1910, le premier institut de foresterie des Philippines, situé à Manille, a lancé un vaste plan de reforestation des zones entourant son campus. Des dizaines d'espèces d'arbres, locales et exotiques, ont ainsi été plantées. Cependant, parmi ces dernières, l'acajou, *Swietenia macrophylla*, originaire d'Amérique centrale et du sud, a vite été à l'origine de problèmes environnementaux. Avec une production de graines annuelle, contrairement aux arbres indigènes, qui n'en donnent que tous les cinq ans ou plus, l'acajou a rapidement colonisé les espaces naturels. Or ses feuilles riches en tanins se décomposent mal et ne sont pas consommées par les animaux locaux.

Cet exemple de reforestation et d'autres se sont ainsi soldés par des échecs ou ont fait naître de nouveaux problèmes. Plus récemment, dans les Pyrénées, à partir des années 1960, lors d'un important programme de reboisement, d'anciennes forêts de hêtres (*Fagus sylvatica*) ont été remplacées par des épicéas (*Picea abies*). La substitution de feuillus par des résineux a modifié la composition de l'humus du sol, devenu plus acide et moins bon pour l'activité biologique. Afin d'en évaluer l'impact, l'un de nous (Thierry Gauquelin) et ses collègues ont étudié, en 2004,

À cause de la déforestation, plus de 10 millions d'hectares de forêts sont perdus chaque année dans le monde

un indicateur de cette altération : les populations de collemboles, un groupe d'arthropodes proches des insectes et essentiels dans le fonctionnement des écosystèmes forestiers (les collemboles participent à la dégradation de la litière et à l'enrichissement de l'humus). Les chercheurs ont mis en évidence une forte baisse de l'abondance et de la diversité de ces espèces.

Heureusement, tous les projets n'ont pas conduit à l'introduction d'espèces invasives ou à une diminution de la biodiversité locale. Certains ont eu des bilans très positifs. C'est le cas de la forêt atlantique de Rio de Janeiro, au

RISQUES D'INCENDIE DANS LES LANDES

Entre 1937 et 1947, lors de canicules et sécheresses exceptionnelles, près d'un tiers de la forêt landaise (300 000 hectares) a été détruite lors d'incendies. De nombreux facteurs ont exacerbé les risques : cette forêt est en fait une plantation monospécifique d'une espèce hautement inflammable, le pin maritime (*Pinus pinaster*). Cette espèce est autochtone (elle était là il y a huit mille ans) et parfaitement adaptée aux sols sableux de la région. Cependant, c'est son usage exclusif et automatique qui est problématique. Sa monoculture quasi industrielle a produit un système uniforme, composé d'arbres de même taille et organisés selon des alignements entre lesquels le vent s'engouffre sans entrave. Dans un projet de reforestation, il faut prendre en compte le risque d'incendie (parmi d'autres) surtout dans une région sèche. Il sera alors impératif d'introduire différentes espèces d'arbres et de prévoir une structure plus irrégulière pour ralentir le vent.

Brésil. Au cours des xvi^e et xvii^e siècles, cet espace a été graduellement détruit par l'exploitation du bois et son remplacement par des fermes cultivant la canne à sucre et le café, ou par des pâturages pour le bétail. Dans la première moitié du xix^e siècle, comme la ville rencontra de graves pénuries d'eau, l'empereur du Brésil Pedro II a demandé au major Manuel Gomes Archer de mener à bien un projet de restauration de la forêt, afin qu'elle puisse faciliter la formation de sources par pénétration de l'eau de pluie dans les sols. Ainsi, entre 1862 et 1874, 72 000 plantules ont été installées sur une zone à présent intégrée au parc national de Tijuca. Ce projet, maintenant vieux de cent soixante ans, était pionnier car il a utilisé un grand nombre d'espèces différentes, principalement natives, et plantées de façon hétérogène.

DES EXPÉRIENCES POSITIVES ET NÉGATIVES

Grâce à ces divers exemples positifs et négatifs de reforestation, les stratégies de restauration de ces milieux forestiers se sont affinées ces dernières décennies. Les spécialistes ont notamment pris en compte le fait qu'il n'existe pas de solution unique applicable à toutes les situations. Dans chaque cas, pour garantir le succès d'un projet, il est impératif de procéder à une analyse en amont des conditions locales, des facteurs qui ont conduit à la destruction de la forêt primaire, etc. Une forêt primaire est une forêt qui n'a été ni exploitée ni défrichée par l'homme, ou qui l'a été par le passé et a eu le temps de retrouver un statut primaire.

Mais avant d'en venir aux méthodes de reforestation, il est important de rappeler pourquoi ces programmes de restauration sont essentiels. Comme dans le cas de Rio de Janeiro, une motivation possible est le rétablissement des services écosystémiques que fournit la forêt : l'approvisionnement en eau potable, mais aussi l'exploitation de bois et de produits forestiers non