

Épidémie en marche

dans une ville virtuelle

Grâce à des simulations, les épidémiologistes étudient le rôle des réseaux sociaux dans la propagation des maladies. **C. BARRETT, S. EUBANK et J. SMITH**

Quelles sont les meilleures conduites à tenir face à l'apparition d'une maladie infectieuse dans une ville ? L'expérimentation étant impossible en la matière, notre groupe a construit un modèle épidémiologique sur une ville virtuelle, fondé sur des interactions réalistes entre individus. Ce modèle, dénommé *EpiSims*, fut initialement conçu pour la ville de Portland, aux États-Unis. Diverses données publiques ont été utilisées pour créer 180 000 lieux spécifiques, une population de 1,6 million d'habitants et des activités quotidiennes réalistes pour ces personnes.

Les informations démographiques, comme l'âge, la composition et le revenu des ménages, pour l'ensemble de la ville et par quartier nous ont permis de créer des ménages

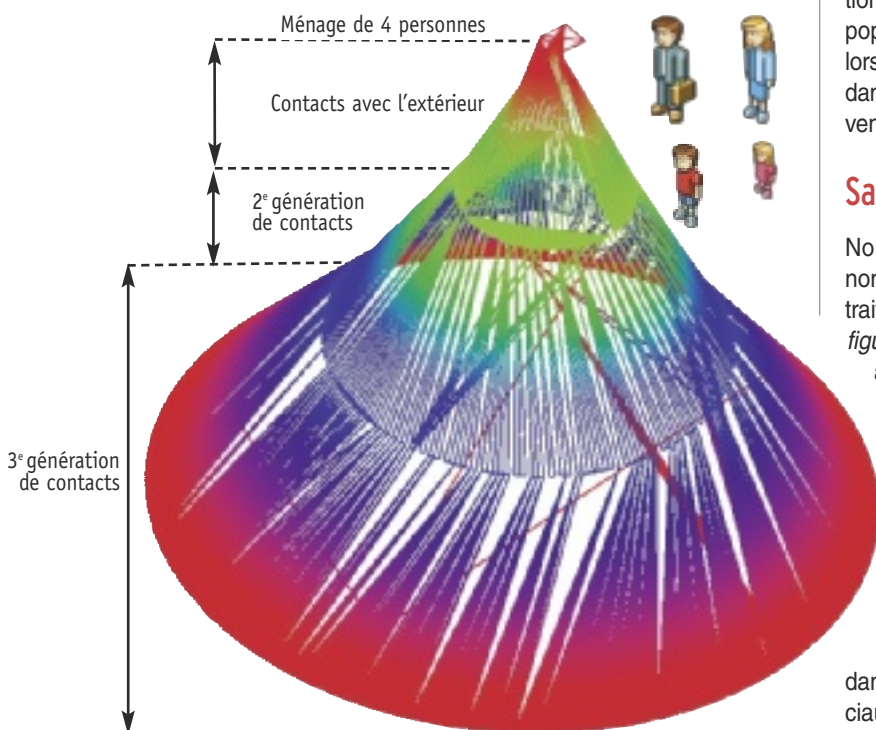
et des individus selon une distribution géographique et des caractéristiques démographiques statistiquement correctes. À partir d'enquêtes détaillées des activités des habitants pour des échantillons de quelques milliers de personnes, nous avons engendré des activités quotidiennes pour chaque membre des familles virtuelles. Nous avons ensuite affecté des lieux à ces activités, grâce aux données d'aménagement du territoire concernant les bâtiments, les routes, les transports publics, les parkings, les parcs, les écoles. On connaît également les variations quotidiennes du trafic et les durées pour aller d'un point à un autre.

En intégrant toutes ces informations dans un modèle informatique, nous avons obtenu la meilleure représentation à ce jour des chemins de contact physique dans des populations humaines de taille réelle. Nous pouvons dès lors suivre la propagation d'un agent pathogène virtuel lâché dans ces populations et tester les effets des différentes interventions sanitaires possibles.

Sauts de puce et supernœuds

Nous représentons les contacts d'une personne adulte nommée Anne par un réseau : Anne est au centre, et un trait la relie à chacune des personnes qu'elle côtoie (voir la figure 1). Tous ces contacts ont eux-mêmes leurs propres activités et rencontrent d'autres personnes. Nous représentons ces « contacts de deuxième ordre » en reliant chacun d'entre eux – par exemple Benjamin, un collègue d'Anne – à tous les individus qu'il a rencontrés. À moins qu'ils ne fassent aussi partie de ses contacts personnels, ceux de Benjamin sont à deux « sauts de puce » d'Anne. En moyenne, on considère que tout individu est relié à n'importe quelle autre personne sur le globe par six sauts de puce au maximum.

Certaines personnes, par exemple les enseignants dans les écoles ou les vendeurs dans les centres commerciaux, possèdent de nombreuses connexions avec le reste du réseau, et forment un supernœud. Pourrait-on enrayer une épidémie en traitant ou éliminant du réseau les supernœuds sans devoir isoler ou traiter toute la population ? Pas si sûr. Les simulations par *EpiSims* ont montré dans les réseaux sociaux un nombre étonnant de chemins de longueur minimale ne passant pas par des supernœuds. Il n'est pas rare que lorsque l'ami d'un ami vous présente une personne,



1. RÉSEAU SOCIAL ET GRAPHE D'EXPANSION. Partant d'une famille de quatre personnes (le losange au sommet), on a tracé les liens de chaque membre avec ses contacts extérieurs directs, puis ceux-ci avec leurs propres contacts (2^e génération), et enfin ces derniers avec les leurs (3^e génération). Le réseau s'élargit de façon exponentielle, si bien qu'une épidémie progresse très vite dans la population. À cause des connexions à longue distance, à travers le graphe, il est impossible de cibler l'isolement de quelques individus.

vous réalisiez que vous la connaissez déjà par ailleurs. Ainsi, une stratégie ciblant uniquement les supernœuds humains freinerait peu la propagation d'une épidémie.

L'étude des réseaux sociaux a révélé une autre propriété inattendue : à part ceux qui vivent dans la réclusion, tous les individus sont de « petits supernœuds ». En d'autres termes, n'importe quel petit groupe, par exemple quatre camarades d'université, est toujours connecté par un seul saut à un groupe plus large. En représentant la structure de ce réseau social, on obtient un graphe d'expansion, qui s'élargit à chaque saut (voir la figure 1).

Ce graphe a une conséquence importante en épidémiologie : les maladies se propagent à une vitesse exponentielle, car le nombre de personnes exposées à chaque nouvelle étape de transmission est toujours supérieur au nombre de personnes exposées à l'étape précédente. Théoriquement, cela signifie qu'il faut savoir réagir très vite pour endiguer une épidémie. La simulation d'épidémies nous a permis de tester cette prédiction.

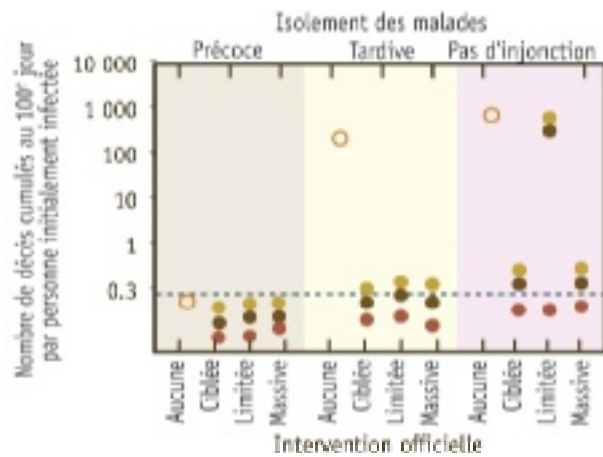
Variole dans la ville

Nous avons modélisé les épidémies de variole, parce que les responsables américains de la sécurité étaient confrontés à des recommandations contradictoires en cas d'une dissémination de ce virus. Serait-il nécessaire de procéder à une vaccination de masse pour prévenir une épidémie, ou la vaccination ciblée des individus exposés et de leurs contacts serait-elle suffisante ? Quelle est l'efficacité d'une quarantaine massive ?

Nous avons supposé que la transmission de la variole nécessite un contact physique étroit avec une personne ou un objet contaminé. La période d'incubation est de l'ordre de dix jours, avant l'apparition de symptômes de types grippeux suivis d'une éruption cutanée. Les victimes sont contagieuses dès que les symptômes apparaissent et sans doute un peu avant que la fièvre n'apparaisse. Sans traitement, environ 30 pour cent des personnes infectées meurent, mais les autres guérissent et sont immunisées.

Dans nos simulations, le personnel de santé est au préalable vacciné. En outre, la chronologie des contacts est respectée. Si Anne contracte la maladie, elle ne peut avoir infecté son collègue Benjamin une semaine plus tôt ; ou encore, si Anne infecte Benjamin et si celui-ci contamine lui-même un membre de sa famille, Catherine, l'infection ne peut pas passer d'Anne à Catherine en moins de deux fois la période d'incubation.

Initialement, 1 200 personnes sont contaminées à l'université et, en quelques heures, elles sont dispersées dans toute la ville au gré de leurs activités. Nous avons alors envisagé plusieurs types de réaction officielle, tels que la vaccination en masse de la population, ou le suivi des individus exposés et de leurs contacts, dans le cas où ils seraient vaccinés et dans le cas où ils seraient mis en quarantaine. Nous avons aussi simulé l'absence de mesures. Dans chacun de ces cas, nous avons modélisé des délais de quatre, sept et dix jours dans la mise en place des mesures sanitaires après l'apparition des premières victimes. De plus, nous avons envisagé que des individus infectés s'isolent en restant chez eux. Chaque simulation a tourné pendant 100 jours virtuels.



2. L'ISOLEMENT PRÉCOCE DES MALADES (en gris) stoppe l'épidémie, que l'intervention officielle consiste en une vaccination ciblée, massive, en une quarantaine, ou même à ne rien faire du tout. La nature et la vitesse de l'intervention importent en cas d'isolement tardif (en jaune) et si aucune injonction d'isolement n'est prononcée (en rose).

Intervention
 ○ Pas de vaccination
 ● Au bout de 10 jours
 ● Au bout de 7 jours
 ● Au bout de 4 jours

Les résultats confirment la prévision théorique fondée sur la structure du graphe d'expansion : le temps de réaction est de loin le facteur le plus important pour limiter le nombre de victimes. La rapidité avec laquelle les gens sont isolés par les autorités sanitaires détermine l'envergure de l'épidémie. La nature des réactions officielles a, au contraire, une influence marginale (voir la figure 2).

En cas d'épidémie de variole, la vaccination en masse de la population, qui présente des risques, n'est pas nécessaire. La vaccination ciblée est tout aussi efficace, à condition d'être combinée à une détection rapide du déclenchement de l'épidémie et à des décisions rapides quant aux mesures à prendre. Nos résultats font également ressortir l'importance des mesures de santé publique telles que la quarantaine, et le fait que la lutte contre l'épidémie devienne la priorité absolue par rapport aux autres affaires courantes.

Bien sûr, les réponses sanitaires appropriées dépendent de la maladie, des types d'intervention possibles et du cadre. Par exemple, nous avons simulé la libération d'une forme inhalable du bacille de la peste dans la ville de Chicago pour évaluer le coût et les effets des différentes réponses. Nous avons découvert que le traçage des contacts, la fermeture des écoles ou le bouclage de la ville entraîneraient des pertes économiques se chiffrant en milliards d'euros, sans être plus efficaces que l'utilisation massive d'antibiotiques, rapidement disponibles et dont le coût est bien moindre.

Plus récemment, nous avons commencé à adapter *EpiSims* pour modéliser une pandémie de grippe aviaire qui pourrait menacer la planète entière. Nous espérons qu'*EpiSims*, qui est capable de modéliser les populations et les épidémies avec réalisme, pourra aider les pouvoirs publics à prendre, le cas échéant, des décisions difficiles.

Chris BARRETT dirige le Laboratoire de simulation à l'Institut de bio-informatique de Virginie, dont **Stephen EUBANK** est le directeur adjoint. **James SMITH** travaille dans le Département de sciences informatiques du Laboratoire de Los Alamos.