

> contredit la propriété examinée, alors il est certain qu'elle est fausse, et il l'abandonne.

La théorie des graphes se prête bien à cette approche, et c'est pourquoi les méthodes automatiques de recherche de conjectures en théorie des graphes ont donné les premiers exemples incontestables de découvertes mathématiques faites par l'ordinateur.

Le programme Graffiti est la première grande réussite de cette approche. Il a été développé et utilisé de 1984 à 2002 par le mathématicien polonais Siemion Fajtlowicz.

Graffiti s'intéresse particulièrement aux invariants des graphes. Ce sont par exemple le diamètre du graphe (la distance – en nombre d'arêtes – maximale séparant deux nœuds), le nombre chromatique d'un graphe (le nombre minimal de couleurs qu'il faut pour colorer les nœuds du graphe en évitant que deux nœuds voisins soient de même couleur), le degré maximal d'un graphe (nombre maximal de voisins d'un nœud), etc.

Plusieurs dizaines d'invariants sont étudiés et les relations entre ces invariants sont complexes, mais essentielles pour la théorie.

En menant des recherches automatisées de relations entre ces invariants, Graffiti a

proposé de nombreuses conjectures intéressantes. Le programme élimine toutes les conjectures contredites par un des graphes qu'il connaît, et celles classiques ou s'en déduisant facilement. Siemion Fajtlowicz indique d'ailleurs que c'est ce travail de sélection qui a été le plus délicat et complexe à programmer. Parmi les conjectures de Graffiti, certaines ont été démontrées par la suite ou invalidées par des chercheurs de la discipline, donnant lieu à plusieurs publications scientifiques et thèses universitaires.

Il ne fait pas de doute que ce programme et ses successeurs contribuent réellement aux progrès mathématiques. Siemion Fajtlowicz a d'ailleurs été amené à travailler avec les meilleurs spécialistes de la théorie des graphes comme Paul Erdős, Bela Bollobas ou Paul Spencer. Erdős et ses coauteurs, dans un article de 1988 où ils démontrent l'une des conjectures du programme Graffiti, reconnaissent son apport. La conjecture en question affirme que $dm_G \leq r_G$, où dm_G est la distance moyenne entre deux nœuds du graphe G , et r_G est la somme des inverses du nombre de voisins des nœuds de G .

En reprenant le principe de Graffiti, d'autres thèmes de recherche ont été abordés et ont donné lieu à une interaction entre mathématiciens humains et ordinateurs proposant conjectures, réfutations et parfois démonstrations. Aujourd'hui encore, en théorie des graphes et dans certains autres domaines, l'utilisation de générateurs de conjectures aide les chercheurs.

RECHERCHER DES FORMULES

Un événement remarquable s'est produit en 1995 dans le domaine de l'aide informatique à la recherche mathématique. Simon Plouffe a programmé sa machine pour qu'elle explore des formules d'un certain type donnant le nombre π et en a effectivement trouvé une que personne ne soupçonnait. Ici, les objets manipulés ne sont pas finis, puisqu'il s'agit de nombres réels ayant une infinité de décimales. Même si la méthode utilisée pour les conjectures sur les graphes ne s'applique pas, le procédé utilisé lui ressemble.

On se donne plusieurs nombres réels dont on connaît des évaluations aussi précises qu'on le veut ; c'est le cas pour π , et pour les sommes de séries dont le terme général est de la forme $1/[r^*(ak+b)]$. On recherche alors s'il existe une combinaison linéaire à coefficients entiers entre les nombres choisis qui soit nulle avec quelques décimales de précision. C'est un travail patient de calcul impossible à mener à la main, mais pour lequel on dispose d'algorithmes efficaces. Quand une relation est trouvée, on teste si elle reste vraie avec un plus grand nombre de décimales. Là encore, c'est

5 L'ORDINATEUR MATHÉMATICIEN ?

Voici les réponses données en 2014 par de célèbres mathématiciens à la question : « Dans cent ans ou dans mille ans, les ordinateurs dépasseront-ils les humains en mathématiques comme ils les dépassent maintenant au jeu d'échecs ? » **Terence Tao** (médaillé Fields en 2006) : « Les ordinateurs vont certainement devenir encore plus puissants, mais j'espère que l'essentiel du travail mathématique continuera d'être fait par des humains... utilisant des ordinateurs. »

Richard Taylor (ce professeur à l'université Harvard a aidé Andrew Wiles à démontrer le grand théorème de Fermat) : « Une meilleure question serait : est-ce qu'un ordinateur recevra la médaille Fields ? »

Jacob Lurie (professeur à l'IAS de Princeton) : « Mille ans, c'est une durée trop longue pour faire des prévisions. »

David Ruelle (professeur à l'Institut des hautes études scientifiques) envisage une sorte de passage de témoins de l'homme à la machine pour



Terence Tao



Richard Taylor



Jacob Lurie



David Ruelle



Marcus du Sautoy

faire des mathématiques : « La capacité intellectuelle à faire des mathématiques est un développement récent du point de vue de l'évolution biologique. J'ai du mal à croire que ce développement récent ait produit quelque chose de si unique qu'il ne peut être imité avec succès par les ordinateurs. Je pense plutôt que la créativité mathématique humaine [...] est une étape dans l'évolution, et qu'il y aura d'autres étapes. La grande question devient alors : quel genre de mathématiques pourrait être produit par une créativité mathématique artificielle ? » **Marcus du Sautoy** (professeur à Oxford), dans son livre *The Creativity Code* (2019), indique : « Les méthodes d'apprentissage automatique donnent aujourd'hui des résultats décevants en mathématiques. Seront-elles un jour capables de s'appliquer aux mathématiques que nous aimons et d'en créer qui leur ressemblent ? C'est bien possible et l'échec actuel est probablement simplement un sursis. »

une question de calcul. Si la relation est numériquement confirmée, l'algorithme propose la conjecture. En utilisant alors les méthodes classiques, le mathématicien reprend la main et tente de démontrer l'égalité.

C'est ainsi que la formule suivante fut découverte, puis rapidement démontrée:

$$\pi = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{1}{16^k} \left(\frac{4}{8k+1} - \frac{2}{8k+4} - \frac{1}{8k+5} - \frac{1}{8k+6} \right)$$

L'intérêt de cette formule est qu'elle permet de calculer les chiffres binaires de π à un endroit donné du développement binaire, sans avoir à calculer les chiffres qui précèdent. Incontestablement, l'ordinateur avait découvert un résultat intéressant. Grâce à ce type de formules, on connaît aujourd'hui des chiffres binaires de π autour de la position 4×10^{16} alors que les méthodes qui calculent tout ne permettent pour l'instant que d'atteindre la position 3×10^{14} .

TROUVER DES DÉMONSTRATIONS

Un certain nombre de tentatives ont été faites pour introduire dans le domaine des mathématiques des méthodes de nature statistique et neuronale.

Kshitij Bansal et son équipe, au centre de recherche de Google à Mountain View, en Californie, a mis au point un programme, intitulé HOList, pour démontrer des théorèmes en se fondant sur une méthode d'apprentissage. Partant du système d'aide à la formalisation et au contrôle des démonstrations HOL-Light, qui a été utilisé pour la mise au point de la démonstration de la conjecture de Kepler en 2014, les chercheurs ont programmé un outil automatique qui recherche des démonstrations en s'inspirant d'une base de démonstrations fournies en exemples. Le système a eu accès à plus de 10 000 démonstrations de théorèmes, exprimées dans le langage de HOL-Light. Parmi elles de nombreuses démonstrations de résultats intermédiaires de la preuve de la conjecture de Kepler.

Notons que ces démonstrations avaient presque toujours été mises au point par un travail guidé par des mathématiciens. Grâce aux paramètres du réseau de neurones du système HOList, ajustés par des milliers d'exemples, celui-ci sait mieux comment choisir et ordonner les éléments d'une démonstration pour atteindre un but. On lui a resoumis les énoncés des théorèmes ayant servi à son apprentissage, et il a pu retrouver, grâce aux tactiques de démonstration apprises, et cette fois seul sans guidage par des mathématiciens, la démonstration de 58 % d'entre eux. Plus intéressant, quand on lui a soumis 3 217 énoncés pris en dehors des énoncés de la base d'exemples, et qu'on a demandé au système de les démontrer, il a su le faire pour 1 251 d'entre

eux. Mais pour l'instant, le système n'a pas découvert de théorèmes nouveaux.

CALCULER DES PRIMITIVES

Un autre exemple tout récent d'utilisation de l'apprentissage profond concerne le calcul des primitives en analyse et la résolution d'équations différentielles. Certaines méthodes utilisées par les mathématiciens, par exemple l'intégration par parties, ou le changement de variable, sont programmées pour qu'un système réussisse seul des calculs d'intégrales. Beaucoup de travaux ont été ainsi menés conduisant à des programmes de plus en plus complexes et efficaces. En reprenant le problème avec des méthodes d'apprentissage et des réseaux de neurones, Guillaume Lample et François Charton, de Facebook, ont mis au point une méthode différente, fondée sur la présentation d'exemples à un réseau de neurones soigneusement configuré pour apprendre sur ce type de problèmes symboliques.

Les exemples proposés au système étaient de trois types: (1) des paires $[f, F]$, où F est une primitive de f , provenant des programmes de calcul fondés sur l'algorithme de Risch ou une de ses variantes; (2) des paires provenant de dérivation qui, elle, est facile et maîtrisée depuis longtemps, contrairement au calcul de primitives: on dérive F , ce qui donne f , d'où la paire $[f, F]$; (3) des paires exploitant la méthode d'intégration par parties.

Les performances du système obtenu égalent et parfois dépassent celle des systèmes classiques comme Mathematica et Matlab. Cela montre de nouveau que l'association de méthodes purement symboliques (dans la phase d'apprentissage) et de méthodes neuronales fait progresser la solution de problèmes symboliques.

L'HUMAIN RESTE INÉGALÉ

Ainsi, pour certaines tâches spécialisées, les programmes égalent ou battent les humains, mais ces méthodes ont toujours des champs de réussite étroits. Même si, indubitablement, la recherche mathématique en tire une aide, les systèmes conçus aujourd'hui se bloquent et cessent de progresser.

Il est formidable d'avoir développé des systèmes informatiques qui formulent d'hypothétiques relations entre les paramètres des graphes, qui mènent des calculs arithmétiques et en tirent des formules de séries nouvelles, qui effectuent des calculs de primitives ou proposent quelques concepts inattendus par combinaison.

Cependant, tous atteignent vite leurs limites. Au contraire, les mathématiciens bouillonnent d'idées nouvelles que les ordinateurs aident parfois à maîtriser, mais en restant toujours de simples esclaves calculateurs sans véritable créativité. L'ordinateur authentiquement mathématicien n'est pas encore là, on attend sa venue! ■

BIBLIOGRAPHIE

An environment for machine learning of higher-order theorem proving, *Proc. of the 36th International Conference on Machine Learning*, 2019.

G. Lample et F. Charton. **Deep learning for symbolic mathematics**, prépublication arXiv:1912.01412, 2019.

C. E. Larson et N. Van Cleemput, **Automated conjecturing I : Fajtlowicz's Dalmatian heuristic revisited**, *Artificial Intelligence*, vol. 231, pp. 17-38, 2016.

D. B. Lenat et P. J. Durlach, **Reinforcing math knowledge by immersing students in a simulated learning-by-teaching experience**, *International Journal of Artificial Intelligence in Education*, vol. 24, pp. 216-250, 2014.

C. E. Larson, **A survey of research in automated mathematical conjecture-making**, *DIMACS Series in Discrete Mathematics and Theoretical Computer Science*, vol. 69, pp. 297-316, 2005.

S. Colton, **Automated Theory Formation in Pure Mathematics**, Springer, 2002.

S. Colton, **Refactorable numbers – a machine invention**, *Journal of Integer Sequences*, vol. 2., article 99.1.2, 1999.

L'AUTEUR



LOÏC MANGIN
rédacteur en chef adjoint
à *Pour la Science*

LA MER... QU'ON VOIT MONTER

Comment se représenter la hausse du niveau des mers?
Deux artistes finlandais ont une solution: des lignes de LED.

Les études se succèdent et les prévisions sont à chaque fois plus alarmantes. Parmi les dernières en date, en octobre 2019, Scott Kulp et Benjamin Strauss, de l'organisation Climate Central, à Princeton, aux États-Unis, montrent que 300 millions de personnes seront exposées aux inondations côtières en 2050; c'est trois fois plus qu'on ne l'imaginait jusque-là. Un mois plus tôt, le Giec dénonçait dans un rapport l'accélération du rythme moyen global de la montée des eaux: depuis 2006, il

est de 3,6 millimètres par an. Les chiffres se multiplient, mais restent néanmoins abstraits, et même semblent dérisoires, tant il est difficile de se représenter à quoi ils correspondent. Le travail des artistes finlandais Timo Aho et Pekka Niittyvirta peut nous éclairer.

Dans le cadre de l'exposition «Champs Libres» dédiée à la transition écologique, au Maif Social Club, à Paris, ils présentent *Lines* (57° 59' N, 7° 16' W). Ils ont décidé de montrer de façon concrète, et poétique, la réalité de l'élévation du niveau marin en investissant le pourtour du centre des arts Taigh Chearsabhagh, dans le village de Lochmaddy, sur l'île de North Uist, dans l'archipel écossais des Hébrides extérieures. Pourquoi là? L'endroit est apparu «particulièrement pertinent, précise Timo Aho, car il ne peut pas se développer en raison justement de la montée des eaux, mais aussi des tempêtes».

Cette maison de Lochmaddy, en Écosse, ne sera pas épargnée par la hausse du niveau marin, que visualisent des ampoules lumineuses.

L'installation des deux Finlandais consiste en des lignes de LED de basse énergie reliées à des capteurs de marée. Quand elle monte, les ampoules s'illuminent et, en soulignant les interactions des humains et de la nature, figurent sur la base des données du Giec (le pire scénario) le possible futur niveau des eaux dans la campagne et sur les murs des différents bâtiments. Pas de doute, le paysage sera radicalement transformé et la vie fortement perturbée, la plupart des maisons étant exposées aux inondations. Les risques à venir deviennent palpables et saisissants.

De fait, rappellent les deux artistes, «l'art a la capacité de faire passer des idées

