



ANTOINE CHAMBERT-LOIR est enseignant-chercheur à l'Institut de mathématiques de Jussieu, université Paris-Diderot. Spécialiste de géométrie algébrique et d'arithmétique, il a reçu en 2017 le prix international Ferran Sunyer i Balaguer pour ses travaux sur l'intégration motivique, menés en collaboration avec J. Nicaise et J. Sebag. Outre le traité *Algèbre corporelle* (éd. de l'École polytechnique, 2005), il a publié de nombreux articles sur les mathématiques.

Les algorithmes changent déjà notre vision du monde

PROPOS RECUEILLIS PAR PASCALE DESCLOS — PHOTOS OLIVIER ROLLER

Grâce aux progrès accomplis au cours des siècles, les mathématiques rythment aujourd'hui nos vies, explorant tous les champs du monde qui nous entoure. Qu'ont-elles de si spécial ? Pouvons-nous les suivre partout ? Où nous emmèneront-elles demain ?

Cahiers de Science & Vie: Les mathématiques occupent une place sans cesse grandissante dans nos vies quotidiennes. Peut-on la définir ?

A. C.-L.: Depuis le milieu du XX^e siècle, les mathématiques ont connu un essor extraordinaire, notamment grâce à l'aide des ordinateurs, qui rendent possibles des calculs de plus en plus poussés et rapides. Elles interviennent désormais dans de multiples domaines: les prévisions météo, l'industrie médicale, la finance, les télécommunications... La théorie des probabilités permet d'étudier des phénomènes complexes et imprévisibles, en les traitant comme s'ils étaient produits par un tirage au sort. Des modèles à base d'équations différentielles stochastiques, c'est-à-dire reposant sur des variables aléatoires, servent ainsi à prédire les évolutions des cotations boursières. Les Big Data, ces données récoltées à très grande échelle, viennent nourrir toutes sortes de statistiques et d'algorithmes. Quant au métier de mathématicien, il s'est professionnalisé et massifié: les universités attirent de plus en plus de chercheurs et d'étudiants; les entreprises internationales, comme les laboratoires de recherche de Google ou de Facebook, les banques, les instituts de météorologie font également appel aux mathématiciens. Certains de ces professionnels se consacrent à la recherche fondamentale; d'autres à la mise en œuvre de techniques existantes. Deux efforts menés de front, mais aussi cruciaux l'un que l'autre. La recherche mathématique est aussi devenue une activité mondialisée, partagée par des spécialistes de tous les continents grâce à des articles, des séminaires, des colloques. L'anglais est la principale langue des échanges, mais le français se porte assez bien! D'ailleurs, notre pays projette d'accueillir le Congrès international des mathématiciens de 2022, qui se réunit tous les quatre ans depuis 1897 et à l'occasion duquel sont remises les médailles Fields, l'équivalent du prix Nobel en mathématiques.

CSV: Quelles ont été les découvertes mathématiques majeures ces cinquante dernières années? Et quelles perspectives ouvrent-elles ?

A. C.-L.: Ces dernières décennies, toutes les disciplines mathématiques ont littéralement explosé: les statistiques et les probabilités, je l'ai déjà évoqué, mais aussi la topologie (étude des déformations spatiales), la logique (étude du langage mathématique), l'arithmétique (étude des propriétés des nombres entiers) ou encore la géométrie différentielle, sur laquelle repose notamment la relativité générale. D'éminents mathématiciens sont parvenus à démontrer des théorèmes ou des « conjectures » sur lesquels s'étaient échinés leurs prédécesseurs aux siècles précédents. Même si les applications de ces travaux ne sont pas toujours tangibles, ils ouvrent de fabuleux champs d'études. Démontré en 1994 par le Britannique Andrew Wiles, trois cents ans après avoir été énoncé, le théorème de Fermat révolutionne notamment la théorie des nombres. Dans le cadre du « programme de Langlands », du nom d'un autre grand mathématicien canadien, se dessinent ainsi de gigantesques ponts entre l'arithmétique et d'autres mondes mathématiques, comme l'analyse harmonique, qui étudie les vibrations d'objets très symétriques. On pourrait aussi citer le Russe Grigori Perelman, qui a apporté en 2003 la preuve de la conjecture de Poincaré: grâce à ce théorème, on peut comprendre la géométrie des plus complexes « espaces de dimension 3 » (traduisez en 3 dimensions, ndlr). Autre belle révolution: aujourd'hui, on sait concevoir et mettre en œuvre des logiciels capables de valider les raisonnements des mathématiciens.

CSV: Quels sont les atouts particuliers dont disposent les mathématiques pour étudier le monde qui nous entoure ?

A. C.-L.: Les mathématiques ont pour elles la précision. Grâce à leur langage rigoureux, elles permettent de définir exactement ce dont on parle, de dire ce qui est vrai ou pas encore vrai. Mais leur force repose aussi sur l'imagination. S'ils sont souvent inspirés du monde réel, les « objets » des mathématiques sont en effet épurés de leur contexte initial pour n'en garder que le cœur; cela permet d'entrevoir des analogies entre des objets qui, parfois, n'ont initialement rien à voir entre eux. Ainsi, face à un problème de physique complexe, un mathématicien peut imaginer un problème différent, plus simple, et le résoudre. D'une part, cela éclaire le problème initial. Et parfois, cette méthode peut se transposer à d'autres problèmes. Pour cela, la perméabilité des barrières entre les différentes disciplines mathématiques, le mélange des idées, est vraiment fondamental. C'est en s'autorisant toutes les questions, sur tous les sujets, dans une dimension parfois esthétique, et en conjuguant liberté et rationalité, que les mathématiques affirment leur pertinence. Les travaux menés en mécanique des fluides par ma collègue Isabelle Gallagher viennent par exemple éclairer un des grands mystères de la physique: pourquoi le temps s'écoule-t-il dans un sens plutôt que l'autre? On sait aujourd'hui que la réponse est liée au grand nombre de particules dans l'Univers...



Un ordinateur ne remplacera jamais un cerveau humain bien entraîné

CSV: Les mathématiciens seraient donc des explorateurs... Mais découvrent-ils, comme l'affirment certains, un monde préexistant régi par les mathématiques ou inventent-ils des mondes totalement nouveaux ?

A. C.-L.: On peut effectivement définir les mathématiciens comme des explorateurs qui avancent dans leurs raisonnements en suivant d'abord leur intuition, en créant des images mentales, en laissant libre cours à leur imagination. La nouvelle de Borges, *La Bibliothèque de Babel*, évoquait une bibliothèque gigantesque, abritant tous les livres déjà écrits et ceux à venir, dans un nombre de combinaisons fini. C'est une idée assez troublante que la définition d'un théorème que nous cherchons soit quelque part dans cette bibliothèque. Pour cela, l'approche platonicienne des mathématiques, cette idée que nous ne faisons que découvrir des choses préécrites, me dérange un peu. Il me semble que par nos choix, nous pouvons écrire une partie du paysage mathématique. Pour moi, les théorèmes sont plutôt comme des îles qui se dessinent : elles n'étaient pas là avant, elles sont là après.

CSV: Sommes-nous tous aptes aux mathématiques ?

A. C.-L.: Je déplace la question : sommes-nous tous aptes à jouer du violoncelle ou à pratiquer la course à pied ? La réponse est oui, sauf handicap majeur. En revanche, nous ne pouvons pas tous jouer magnifiquement les suites pour violoncelle de Bach, ni courir un 100 mètres en moins de 10 secondes. Dès qu'on est face à deux nombres ou à une opération, on fait des mathématiques ou on demande à quelqu'un d'en faire pour nous. Mais mathématicien, c'est aussi un métier, qui repose sur des années d'apprentissage, d'entraînement, de travail – un travail qui se poursuit pour certains dans la longue durée, bien après l'université. Les jeunes chercheurs découvrent au passage que la méthode scolaire n'est pas toujours la plus adaptée dans leur quête : pour résoudre un problème mathématique, mieux vaut

parfois partir dans toutes les directions, sans hiérarchie, en approchant des textes avec l'esprit libre, en échangeant avec des collègues d'autres disciplines. C'est ainsi que peu à peu, le paysage se dessine, par petites touches, comme dans un tableau impressionniste...

CSV: Les mathématiques peuvent-elles changer notre vision du monde ?

A. C.-L.: Le traitement des Big Data change déjà notre manière de voir le monde ! De nos jours, des algorithmes mis au point par des mathématiciens sont capables de traduire efficacement des textes dans toutes les langues sans rien y comprendre, en s'appuyant uniquement sur une vision statistique. D'autres permettent à un ordinateur d'apprendre si bien en jouant contre lui-même qu'il devient capable de battre le champion du monde de go. Ces performances ne sont pas seulement impressionnantes, elles laissent imaginer la création de cerveaux artificiels, capables de favoriser les connexions les plus efficaces pour réaliser une tâche. Le Big Data change aussi nos façons de travailler. Il produit tant de données qu'on ne peut toutes les explorer. Mais en poussant toujours plus loin le modèle statistique, les mathématiciens parviennent à mettre au point des algorithmes qui traitent des échantillons de données au hasard pour en déduire des informations pertinentes. Plus besoin d'explorer des archives de manière exhaustive, systématique : on peut désormais prendre des décisions efficaces avec des informations partielles et aléatoires. C'est une sacrée révolution, même si les algorithmes qu'on crée ont parfois des biais désastreux. Utilisés pour décider du recrutement d'un employé, de l'attribution d'un prêt bancaire ou même d'une libération de prison, comme l'évoque la mathématicienne Cathy O'Neil dans *Weapons of Math Destruction*, ils risquent de renforcer les discriminations de toutes sortes, sociales, économiques, raciales... D'où l'intérêt de créer un label pour des algorithmes éthiques.

CSV: Les mathématiciens peuvent-ils un jour être remplacés par les ordinateurs ?

A. C.-L.: Selon une formule connue, on ne devrait pas juger un mathématicien seulement sur sa capacité à résoudre des problèmes, mais aussi sur sa faculté à se poser des questions. Or, ce sont bien les mathématiciens qui posent des questions aux ordinateurs. Ceux-ci sont des outils puissants, qui offrent une aide extraordinaire. Ils peuvent faire des milliers de calculs, accélérer le processus des démonstrations, voire bâtir des bouts de raisonnements et créer ensuite des chemins pour vérifier si les choses sont vraies ou pas. Mais ils ne font que ce qu'on leur demande. Un ordinateur ne remplacera jamais un cerveau humain bien entraîné pour la simple et bonne raison qu'il ne peut pas faire preuve d'imagination, ni même décider si les choses sont intéressantes ou pas, c'est-à-dire nous intéressent. Les mathématiciens resteront donc à mon avis indispensables : pour étudier le monde, mais aussi pour transmettre ce qu'ils en ont compris aux ingénieurs, aux apprentis-mathématiciens, en fait à tous les êtres humains.