

The banner features a light green background with two golden busts of classical figures on either side. At the top left, there are logos for the University of Niš and the Center for Applied Mathematics, CAM-FMEN, Faculty of Mechanical Engineering. At the top right, there are logos for the International Chair in Mathematical Physics and Applications (ICMPA-UNESCO chair) and the University of Abomey-Calavi, Benin. The central text reads: **WEBINAR**, **MATHEMATICS FOR HUMAN FLOURISHING IN THE TIME OF COVID AND POST COVID-19**, and **21 of October 2020**.

Mathématiques, pandémie et systèmes complexes

Bertrand Jouve

Résumé :

Nous questionnons indirectement le rôle des mathématiques dans la réponse à la pandémie de COVID-19 en interrogeant d'abord leur place dans l'analyse de la complexité des systèmes auxquels nous sommes confrontés aujourd'hui. Ensuite, nous abordons le rapport qui en découle entre les mathématiques et les autres disciplines et pourquoi il est important que les mathématiques prennent part à des approches scientifiques pour traiter les grands défis posés par ces systèmes.

Je remercie les organisateurs Melanija Mitrović et Norbert Hounkonnou de me donner l'opportunité de ce short talk.

Je ne travaille pas dans le domaine de la modélisation des épidémies, je ne donnerai donc pas d'informations précises sur les modèles mis en place dans le cas du COVID-19. Par contre, je travaille depuis longtemps maintenant à l'utilisation de la théorie des graphes pour modéliser les grands réseaux réels - réseaux d'interactions sociales, réseaux d'échanges commerciaux, réseaux de neurones réels - et j'ai participé à de nombreux projets interdisciplinaires. Or, d'une part la théorie des graphes et la notion de « réseau » sont tous deux très présents dans les études scientifiques relatives au COVID-19, et d'autre part la pluridisciplinarité apparaît de plus en plus comme majeure pour un traitement efficace du COVID-19. Je vais donc me permettre de questionner indirectement le rôle des mathématiques dans la réponse à la pandémie en parlant d'abord brièvement de complexité des systèmes auxquels nous sommes confrontés aujourd'hui, puis du rapport qui en découle entre les mathématiques et les autres disciplines et pourquoi il est important que les mathématiques prennent part à des approches scientifiques pour traiter les grands enjeux posés par ces systèmes, enjeux par exemple sociétaux, environnementaux, ou de santé.

Modèles mathématiques de propagations d'épidémies, gestion de l'information statistique sur le nombre de malades, recherche de vaccins, mise en place de gestes barrière, mesures économiques, ... il est apparu assez rapidement finalement qu'on ne pouvait pas dissocier ces différentes actions si on voulait agir efficacement contre la pandémie. Nous sommes en présence de ce qu'on appelle un « système complexe » qui se caractérise par des dynamiques multi-échelles, des phénomènes de cascades induisant de brusques changements quantitatifs et qualitatifs, et des boucles de

rétroactions qui induisent de la non-linéarité dans la dynamique du système. Ces systèmes présentent un comportement global qui peut difficilement être prévu si on ignore les interactions entre ses différents composants. Si cette complexité saute aux yeux du monde à l'occasion de la pandémie actuelle, cela fait quelques décennies que des chercheurs s'intéressent à l'analyse des systèmes complexes¹ et c'est quasiment un cliché de dire que la complexité est partout : changements environnementaux, mondes sociaux, dynamiques collectives dans les systèmes biologiques, systèmes urbains et de transport, risques naturels, fonctionnement du cerveau, ... L'analyse de ces systèmes complexes a été assez difficile jusqu'au milieu du XXe siècle, mais notre capacité à produire maintenant une énorme quantité de données sur le fonctionnement du monde réel, combinée à une puissance de calcul et à une capacité de stockage croissantes, a permis un accès renouvelé à la compréhension et au traitement de cette complexité, tant d'un point de vue pratique que théorique. Toutefois, pour de nombreuses raisons, ce processus contourne souvent les approches qualitatives, qui sont courantes dans les sciences humaines et sociales, et même dans les sciences expérimentales. Pour ne donner que quelques exemples, les défis que nous devons relever aujourd'hui concernent par exemple, pour moi, notre incapacité à inclure les connaissances locales, traditionnelles ou indigènes dans les modèles globaux de développement durable, la difficulté d'introduire des connaissances cliniques dans les approches de bio-ingénierie, la faiblesse des critères non économiques dans l'évaluation des avantages comparatifs sur les marchés dynamiques, ou encore la difficulté à intégrer les connaissances sur les acteurs dans les modèles de développements environnementaux, ... Pour les décideurs, publics ou privés, disposer de données quantitatives en masse peut même conduire à écarter tout échange nécessaire pour comprendre la dynamique d'un phénomène complexe en cours. Lors d'une conférence sur le Big Data à Toulouse en 2015, Bernard Stiegler² disait : « [...] le problème est que ces Big Data ont une fâcheuse tendance à court-circuiter tous les processus de délibération, absolument tous [...] ». Ce que je veux signifier ici, c'est que même s'il y a urgence à mieux comprendre la complexité du monde, complexité que nous participons à construire, il n'y aura ni miracle du Big Data ni discipline scientifique salvatrice. Croire en l'un ou l'autre serait même contre-productif au sens où cela freinerait la mise en place d'une approche efficace de l'analyse de la complexité. Alors, rendu possible par le Big Data, beaucoup d'espoir est fondé sur le « machine learning » qui s'introduit partout dans notre société et en particulier pour guider l'action, qu'elle soit politique, économique ou même médicale, dans un monde qui va de plus en plus vite, qui est de plus en plus interconnecté. Pour rester dans la course il faut être rapide et, comme l'explique Etienne Klein en citant Francis Bacon, il faut innover car l'idée de l'innovation salvatrice est prédominante. Or personne n'est plus rapide qu'un ordinateur qui traite jusqu'à plusieurs centaines de milliards d'opérations à la seconde, donc on confie la responsabilité de la décision à des algorithmes et des data. Les mathématiques se retrouvent ainsi au centre du jeu puisque ce sont elles qui souvent structurent les modèles de simulation que l'on va utiliser en masse pour juger de « l'efficacité » d'une innovation, mais aussi d'un choix politique³. Par exemple en France, lorsque les acteurs politiques ont mesuré l'ampleur de la pandémie, d'un seul coup, tout le monde découvrait les modèles mathématiques d'épidémie et le fameux R_0 . Il peut exister à ce moment là, consciemment ou inconsciemment, une double vision

¹ Le Santa Fe Institute est fondé en 1984. <https://www.santafe.edu>

² https://www.canal-u.tv/video/fmsh/les_donnees_en_shs_quelle_politique_bernard_stiegler.21150

³ voir par exemple <https://epidemapp.com/>

erronée des mathématiques. D'abord parce qu'on pourrait nous faire croire qu'elles sont capables de mettre la complexité en boîte alors qu'aujourd'hui les modèles dont nous disposons ont besoin de milliers d'exemples pour apprendre et sont facilement trompés. Mon ami économiste Alan Kirman me rapportait l'année dernière les propos de Mélanie Mitchell⁴ à propos de l'apprentissage machine « *la machine ne comprend pas ce que veut dire "the meaning", c'est ça le problème* ». Ensuite parce que cela pourrait laisser penser que les mathématiques se résument à un traitement plus ou moins évolué de la donnée. Alain Connes⁵ disait dans un interview sur France Info le 8 mai 2018 : « *Ce qui me frappe le plus c'est qu'Évariste Galois était capable de comprendre sans avoir à faire les calculs. De mon point de vue on est en train de troquer le "comprendre sans avoir à faire" pour le "faire sans comprendre". Or l'essence de l'homme c'est de comprendre et ça c'est complètement hors de portée de l'intelligence artificielle [...] Pour l'instant l'intelligence artificielle il lui manque le bon sens et surtout le génie* ». J'ai l'impression que nous assistons finalement à une importante perte collective de confiance en la société, en nous-même.

Pour comprendre une crise comme la pandémie actuelle de COVID-19, l'approche par les outils et méthodes des systèmes complexes est une façon intégrée d'aborder les questions, à laquelle on ne peut se soustraire et qui ne contourne pas pour autant les disciplines. Ancrée dans les disciplines mais sortant de l'enfermement disciplinaire, elle permet de saisir les interactions entre différentes dimensions qui entrent en jeu. Comme toute démarche interdisciplinaire, nouvelle pour nous chercheurs du XXe ou XXIe siècles, il s'agit d'une révolution de pensée et de savoir-faire qui se construit dans la durée, et l'urgence des situations auxquelles nous avons et aurons à faire face ne doit pas nous faire croire que le temps de la recherche scientifique est compressible à loisir. La science est un univers de controverses où les méthodes, les résultats, les modèles doivent prendre le temps d'être discutés pour être robustes. Les mathématiques n'échappent pas à cette contrainte, et nous savons bien que les modèles mathématiques qui sont utilisés aujourd'hui résultent de dizaines d'années de recherche. Quelle est la force des mathématiques dans ce contexte et comment se positionnent-elles ?

La puissance des mathématiques provient en grande partie de leur généricité, nécessaire pour cheminer à travers les concepts. Habitué à raisonner sur des objets de nature abstraite, le mathématicien dispose ainsi de compétences uniques qui apportent à un groupe pluridisciplinaire la capacité à saisir les interactions entre concepts et les raisonnements logiques. Le mathématicien a aussi la capacité à n'écarter aucune piste a priori, puisqu'il sait qu'en changeant les hypothèses un résultat faux peut devenir vrai. Il n'existe pas de tabou en mathématiques, personne ne vous empêche de supposer vraies certaines hypothèses et d'explorer ce que cela implique. D'autres sciences au contraire ont besoin de se développer dans des silos reposant sur des hypothèses plus ou moins implicites, ou des observations, qui ne peuvent être transgressées ; l'efficacité est remarquable mais le transfert à d'autres hypothèses souvent peu envisageable. Il ne s'agit aucunement ici de positionner les mathématiques au-dessus d'autres sciences, plus empiriques ou ancrées dans les réalités du monde, mais de préciser les différences. Pour un mathématicien par exemple la contradiction est bannie du raisonnement mathématique alors qu'elle est pleinement présente dans nos sociétés et que le débat contradictoire est le cœur méthodologique des sciences humaines et sociales. Dans un

⁴ Mitchell, M. (2019). Artificial Intelligence Hits the Barrier of Meaning. *Information*, 10(2), 51.

⁵ Médaille Fields 1982, Prix Crafoord 2001, Médaille d'or du CNRS 2004.

monde réel qui a l'ambition de comprendre et maîtriser son évolution, où il est demandé de prévoir toujours plus loin dans le temps, cette universalité des mathématiques pourrait aveugler. A ce stade du raisonnement, on pourrait en fait discuter de l'applicabilité des mathématiques ou de savoir si le monde est mathématique. De Galilée à Einstein en passant par Kant, ces questions sont discutées depuis l'antiquité et je n'aurais pas les compétences à entrer dans de telles considérations d'ordre philosophique. Par contre il me semble qu'on peut admettre que les mathématiques ne sont ni des sciences expérimentales ni des sciences de l'observation et que l'efficacité des mathématiques aussi bien comme « outil de maîtrise de la complexité » que comme « langage de l'imagination du monde »⁶ ne va pas de soi. Comme le souligne Jean-Michel Salanski, « toutes les notions employées pour décrire le réel et son changement sont concernées et affectées par le cadre mathématique choisi ». Un modèle se construit toujours sur des hypothèses et avec des choix de variables ou de distributions de variables possibles qui ne sont pas anodins, doivent être discutés, et sont généralement des simplifications de la réalité. Il ne suffit pas de programmer des modèles formels et de leur fournir des « Big Data » pour récolter en sortie une représentation du monde dans 10, 50 ou 100 ans. Il faut vraiment concevoir un modèle comme une pièce d'un puzzle que l'on construit à plusieurs, chacun ayant des savoirs et compétences différents. Allons jusqu'à citer Georges E.P. Box : « all models are wrong, but some are useful ».

Pourtant je suis convaincu que les mathématiques doivent s'inviter, avec les autres disciplines, dans les dispositifs d'étude et de compréhension des phénomènes complexes qui constituent le monde d'aujourd'hui et dans lesquels elles sont déjà impliquées (développement des réseaux sociaux, croissance de bulles financières, ...). Pour cela elles ont un défi supplémentaire à relever : dépasser la technicité de leur langage néanmoins nécessaire. C'est la condition pour qu'un échange interdisciplinaire soit possible, en particulier avec des sciences moins formalisées mais qui ont aussi leurs concepts, méthodes et outils. Le mathématicien doit probablement se mettre en danger et chercher à énoncer en termes « simples » les représentations qu'il ou elle a en tête, partager le fait qu'elles font sens pour lui ou elle, dans le monde mathématique, et qu'elles peuvent aussi faire sens dans un processus interdisciplinaire de construction d'innovations pour la compréhension et l'amélioration du monde dans lequel nous vivons. Si l'écoute et la considération réciproques sont là, le discours peut porter. Pour autant, encore faut-il que les mathématiques soient bien accueillies et je suis inquiet quand, lors d'une rencontre en 2017 sur l'IA organisée par Facebook Paris, Yann LeCun, responsable de la recherche en intelligence artificielle de Facebook, dit à propos du fait que l'on ne sait pas bien comment les algorithmes d'apprentissage profond fonctionnent « [...] ce n'est pas un problème majeur. C'est très satisfaisant d'avoir une explication, et cela rassure l'humain si un système d'intelligence artificielle produit une explication. Mais, à la fin, ce que l'on veut, c'est avant tout une bonne fiabilité ». Etait-il simplement provocateur ? Dans un monde qui voit l'IA se développer à grande vitesse, il est probable que celle-ci soit fortement mobilisée pour répondre aux grands défis sociaux, environnementaux ou de santé comme la pandémie actuelle. Peut-on accepter que les outils utilisés ne soient pas compris par les humains ? Peut-on lutter efficacement contre une pandémie si l'on sait simplement ce qu'il va se passer mais sans comprendre pourquoi ? Ces quelques phrases, qui percutent frontalement les propos reportés

⁶ Salanskis, Jean-Michel. « Appliquer les mathématiques », *Rue Descartes*, vol. 74, no. 2, 2012, pp. 4-19.

précédemment d'Alain Connes, ne sont-elles pas la négation même de la participation des mathématiques à la mise en place de ces outils de l'IA ? N'est-ce pas nier la force de la théorie mathématique ?

Pour conclure, je dirais que les mathématiques n'ont pas le choix et doivent s'inviter à la table des grands défis socio-environnementaux et de santé auxquels nous sommes confrontés. Elles doivent s'y inviter car elles apportent des compétences complémentaires aux autres champs scientifiques et, dans le domaine de l'IA qui est lui-même invité à la table, c'est sur elles que repose en partie la responsabilité de comprendre pourquoi certains systèmes « fonctionnent ». A terme, je suis convaincu que le « faire sans comprendre » ne peut qu'être victime de son ambition excessive s'il veut s'immiscer dans l'ensemble des processus décisionnels. Ne subsisteraient alors de façons pérennes que les dispositifs que l'humain est capable de comprendre, et donc de maîtriser. Les mathématiques doivent s'y inviter aussi car elles risquent sinon d'être instrumentalisées par ceux qui les « utilisent » sans les connaître et potentiellement servir de caution à des choix importants. Elles doivent s'y inviter sans l'illusion de détenir la vérité absolue. Comme l'écrit Jacques Austruy⁷ dans les années 60, période où l'engouement pour le structuralisme encourage les formalisations combinatoire et topologique du monde, « [...] la mathématique, si elle est une langue précise, est une langue moins neutre que ne le croient parfois les mathématiciens ».

⁷ Austruy, J. (1961). Methodes mathematiques et sciences de l'homme. *Revue économique*, 12(3), 414-439.