

Société de Calcul Mathématique SA

*Outils d'aide à la décision*

*depuis 1995*



## Le rôle des mathématiques dans la prise de décision

Débat entre :

Cédric Villani, mathématicien, député de l'Essonne,

et

Bernard Beauzamy, PDG SCM SA

### **Sujet :**

La décision, publique ou privée, semble de nos jours de plus en plus irrationnelle. Trois raisons apparaissent :

- Les données nécessaires sont rarement disponibles, ou bien ne sont pas au bon format, ou bien sont contestables, etc.
- Il faut agir rapidement et on manque de temps pour une décision rationnelle, qui nécessite un examen approfondi des données et des raisonnements, pour réduire les risques d'erreur ;
- Les organismes publics, les entreprises privées, disposent rarement d'un retour d'expérience. Bien que notre civilisation soit très ancienne, et que des "plans de prévention des risques" existent un peu partout, on a le sentiment que les responsables sont pris au dépourvu lorsque quelque chose se produit.

Le mercredi 25 novembre 2020 à 14 h 30

Débat diffusé sur "Zoom".

Transcription (version préliminaire)

*Bernard Beauzamy* : Merci à Cédric Villani d'avoir accepté le principe de ce débat. Le thème est l'utilisation des mathématiques pour la prise de décision. J'aurais souhaité que le débat ait lieu en nos locaux, mais les circonstances ne l'ont pas permis. L'avantage est que nous pouvons avoir beaucoup plus d'invités : notre salle ne peut contenir que 50 personnes, tandis que nous avons 110 inscrits au débat ; les 110 participants se décomposent en à peu près la moitié qui vient du monde académique (enseignants, chercheurs) et la moitié qui vient d'organismes publics ou d'entreprises.

Pour introduire le débat, je vais donner un exemple pour expliquer en quoi les mathématiques peuvent aider. Il y a quelques années, je suis allé en Russie, à Novossibirsk, et les Russes m'ont dit qu'ils avaient un problème avec les incendies en Sibérie, les feux de forêt, les feux de taïga, etc. La question posée était de savoir où mettre les pompiers, combien il fallait d'avions où les mettre, etc.

C'est un problème qu'on appelle en mathématique "allocation de ressources". C'est un problème instantané, en ce sens que le pouvoir politique à Novossibirsk peut décider de mettre les avions, les pompiers, où il veut. Il faut que cela soit pertinent par rapport à l'endroit où les incendies se développent, endroit qu'on ne connaît pas nécessairement. Donc, il y a un raisonnement probabiliste à faire et on peut imaginer que les mathématiques apportent un appui tout à fait significatif.

A l'inverse, si on regarde le développement de la SNCF en France, les choses sont différentes. La SNCF date du 19<sup>ème</sup> siècle, mais c'est seulement en 1937 qu'elle acquiert le statut qu'on lui connaît. On s'aperçoit que les lignes de la SNCF, les gares de la SNCF, les horaires de la SNCF ne résultent pas d'un processus d'optimisation, mais plutôt d'une évolution au sens darwinien du mot : la SNCF passe son temps à créer des lignes nouvelles en fonction des besoins et à supprimer des lignes anciennes, en fonction des besoins, à modifier ses horaires, etc.

Sur cet exemple, on a le sentiment que les mathématiques jouent un rôle beaucoup plus limité. C'est là-dessus que nous souhaitons interroger Cédric Villani : dans vos fonctions, soit de député de l'Essonne, soit au sein de l'Assemblée nationale, êtes-vous confronté à ce genre de problématique que j'appellerai grossièrement "allocation de ressources" ?

*Cédric Villani* : Merci beaucoup, cher Bernard, pour cette introduction. Je vais faire un petit panorama qui permettra de lancer le débat sur cette question du rôle des mathématiques dans la prise de décision et je dirai évidemment quelques mots sur le problème d'allocation de ressources qui est emblématique de de cette classe de problèmes.

Rappelons d'abord que les mathématiques, comme les sciences en général, sont une discipline qui a vocation à décrire, à comprendre et à agir sur le réel. La particularité des mathématiques est sans nul doute le fait qu'elle exige une rigueur très particulière dans le raisonnement, un formalisme abstrait et la conviction qu'il y a un aller-retour fructueux entre un raisonnement qui se passe sur des modèles, qui se fait dans l'abstrait, avec des règles abstraites et un monde réel qui, finalement, obéit de façon bien meilleure.

On aurait pu croire a priori à ces règles déduites de l'expérience mathématique. C'est important, je crois, par rapport à ce que vous dites, aussi bien l'exemple que vous présentez, cher Bernard, que les exemples qu'on peut avoir en tête dans l'histoire des sciences mathématiques. C'est toujours ce qui permet d'aller au-delà de l'intuition, de démontrer des résultats paradoxaux, de gérer des échelles de temps et d'espace qui sont juste incommensurables, que ce soit dans l'infiniment petit ou dans l'infiniment grand. Sur des milliards d'années, des années-lumière ou des nanomètres, on se retrouve à manipuler des ordres de grandeur qui sont absolument inatteignables à notre intuition, qui ne correspondent pas du tout à nos sens, à ce que notre expérience nous a appris. C'est là que le formalisme mathématique arrive à faire ses preuves.

Et quel meilleur exemple que les lois de la gravitation universelle, qui s'appliquent sur des échelles de temps et des espaces tels que l'humanité ne peut les concevoir ? elle n'ira jamais coloniser les étoiles. Impossible de concevoir ce que sont les milliards de milliards d'étoiles, et les distances qui sont en jeu. Pourtant, des équations simples, qui ont plusieurs siècles, expliquent le très gros de ces phénomènes et s'appliquent avec une précision stupéfiante. On a ici quelques exemples très frappants qui ont fait dire à certains que l'univers était écrit en langage mathématique.

*BB* : Vous êtes un optimiste né.

*CV* : Bernard, on a besoin d'un peu d'optimisme, surtout quand on voit la tristesse de la vie politique et écologique mondiale.

*BB* : Vous avez ma bénédiction sur ce point.

*CV* : Et je vous en remercie, cher Bernard.

*CV* : Voici quelques exemples célèbres que l'on peut garder en tête ; ils permettent de structurer une réflexion ou un débat. Je parle d'un problème qui se pose par rapport à la prise de décision. Très tôt, par exemple, Ératosthène a mesuré le rayon terrestre, il y a à peu près deux millénaires. Mais ce n'est pas une question de prise de décision. On en a retiré quelque chose d'important au plan philosophique, au plan de la connaissance du monde, en revanche, cela n'a pas motivé une prise de décision politique.

En revanche, l'exemple de la première estimation de l'efficacité de la vaccination ou d'une forme primitive de vaccination, du temps de Bernoulli, a démontré pour les autorités de l'époque, pour l'Académie des sciences, que vacciner était efficace, même avec les taux d'échec qu'on avait à l'époque. Ce n'était pas du tout quelque chose d'intuitif. Il y avait un raisonnement mathématique, des probabilités qui intervenaient et le résultat était : il faut donc vacciner, ça augmente l'espérance de vie des citoyens.

Un autre exemple très connu est celui de la Seconde Guerre mondiale. L'analyse mathématique a été l'un des ingrédients clés qui ont permis aux équipes d'Alan Turing de déchiffrer le code secret allemand. Il fallait des mathématiques sophistiquées pour mener cette mission à bien et c'était capital dans la prise de décision.

*BB* : J'aime bien cet exemple, parce qu'ils rejoint ceux que nous mentionnons. J'ai l'habitude de dire qu'il n'y a que deux exemples où l'humanité a fait appel à des mathématiciens professionnels ; l'un était Archimède et l'autre Turing. Et dans les deux cas, ça s'est mal terminé pour les intéressés. Archimède a été tué pendant le siège de Syracuse et Turing s'est suicidé juste après la guerre. Il était homosexuel. On lui a fait toutes sortes d'ennuis et il s'est suicidé.

Il n'y a que deux exemples ; la durée de retour du phénomène est de l'ordre de 2200 ans et à chaque fois, ça se termine mal pour les intéressés.

*CV* : Effectivement, ce sont deux exemples dans lesquels, à chaque fois, les dirigeants, soit le tyran de Syracuse, soit les Britanniques, effectivement, vont chercher un mathématicien brillant pour accomplir sa tâche en temps, en temps de crise.

Parmi les exemples de dirigeants qui ont fait confiance aux scientifiques, on ne peut pas passer sous silence Napoléon avec tout son cortège de savants, le rôle qu'il a eu pour favoriser l'Académie, la façon dont il a fait monter ses savants préférés dans les cercles de décision ou de pouvoirs pour certains, les Monge, Laplace, Lagrange, avec des carrières très différentes et beaucoup d'autres. On sait à quel point la technologie, d'une façon générale, a joué un rôle majeur dans l'administration de l'Empire et dans la façon de se maintenir au plus haut niveau.

Je voudrais parler de quelques petits exemples intéressants pour la discussion, où l'on peut trouver une friction entre l'idéal de la pratique scientifique et l'idéal de la question politique.

Ce sont deux exemples qui me sont chers et qui sont aussi liés à votre exemple d'allocation optimale. Ils sont liés au transport optimal ou à des problèmes de transport au moindre coût. Vous avez des configurations d'un certain bien, des configurations A et des configurations B. Vous voulez passer de la configuration A à la configuration B, en transportant les objets avec un coût total minimal ou de façon équivalente. Ou bien, vous avez des objets que vous voulez appairer, des employés avec des habitations, etc., et vous voulez faire l'appariement d'une façon optimale.

Le premier à poser la question presque explicitement en ces termes est Gaspard Monge, dans les années 1780, et je le vois vraiment comme un problème d'ingénieur. Certains pensent qu'il avait en tête aussi des applications qui rejoignent votre exemple, cher Bernard. On a des soldats, on a une ligne de front, on a des positions à défendre avec des ressources militaires. Où met-on les uns ? Comment est-ce qu'on transporte les uns vers les autres ?

L'un des plus hauts faits d'armes de Monge est l'invention de la géométrie descriptive, technologie d'importance telle qu'elle ne pouvait être enseignée qu'à des officiers de haut rang ; cela avait valeur de secret défense. On voit ici à quel point l'objectif de diffusion de la science et l'objectif politique peuvent parfois entrer en contradiction.

On retrouve la même problématique de confidentialité de la diffusion pour d'autres raisons dans la carrière de l'autre grand héros de l'optimisation, c'est Léonid Kantorovitch, au milieu du 20ème siècle. C'est la fameuse dualité de Kantorovitch. C'est un mathématicien qui a fait tout l'arsenal, des mathématiques pures jusqu'aux mathématiques appliquées.

Un des problèmes qu'il a résolus, c'est la tarification des taxis. À l'époque, avec son équipe de mathématiciens appliqués, il résout ce problème : comment faire une tarification des taxis qui soit juste et efficace ? Et dans le cadre du transport optimal ? Ce qui est remarquable, c'est que sa fameuse théorie, dualité de Kantorovitch, s'est retrouvée purement et simplement censurée par le système communiste, parce qu'il y avait une interprétation duale, une allocation de ressources en termes de théorie des coûts, des prix optimaux. Quelle est la bonne façon de déterminer le prix de telle ou telle marchandise en fonction de l'endroit où l'acheminer ou de tel ou tel service que vous vous rendez ?

Et imaginez tout ce que cela peut avoir de dangereux dans un dans un système idéologique marxiste, une théorie qui fixe une valeur rationnelle au prix et qui vous dit qu'on peut déterminer le prix de manière scientifique, et pas selon la façon dont Marx l'a énoncé, du travail qu'on y a mis. Le fameux théorème de dualité de Kantorovitch, qui fait la correspondance entre un problème de transport optimal et un problème de prix optimal, était littéralement interdit : interdit d'en parler, interdit de publication. C'est une forme intéressante de censure politique de faits scientifiques. Et cela vous montre aussi que, chaque fois que le pouvoir politique est intéressé à censurer quelque chose, le pouvoir de décision qu'il peut y avoir.

Dans le cas de Monge, cela concerne les outils qu'on peut préparer pour l'attaque d'un camp militaire, dans le cas de Kantorovitch, les outils qu'on peut avoir pour déterminer un prix de façon objective et justement, aller contre quelque chose qui soit politique.

L'obsession de Kantorovitch pendant une partie de sa vie a été justement de sortir de cette censure, persuadé que l'économie russe en temps de guerre allait s'écrouler parce que les prix n'étaient pas fixés comme il le fallait. Il s'impliquait extraordinairement, écrivant au sommet de l'Etat, n'échappant au goulag que parce que les plus hautes autorités soviétiques avaient compris qu'ils faisaient partie de ceux qu'il fallait épargner pour le bien de la Russie à venir, ceux qui allaient participer à la mise au point de la bombe atomique, etc.

Ce sont des exemples historiques que j'ai cités aujourd'hui. Les exemples de décisions mathématiques, décisions politiques ou éclairées par les mathématiques, il y en a partout, ou du moins dans les grands problèmes sur lesquels les politiques ont à se prononcer un peu partout à travers le monde. Ils se construisent toujours avec des dossiers scientifiques complexes de nos jours, et toujours avec une dose de mathématiques importante, d'autant plus que les sujets sont compliqués ou échappent à notre intuition.

C'est le cas du réchauffement climatique. Il s'agit de prédire le climat sur de grandes échelles de temps. Impossible d'avoir une intuition sur les évolutions du climat sans faire tourner les modèles mathématiques sur des ordinateurs puissants et avec des équations qui ont été éprouvées avec le temps.

C'est précisément, dans ce cas-là, un outil qui vous permet d'aller au-delà de l'intuition. Notre expérience sensible, sur une génération, ne permet pas de ressentir les effets du réchauffement climatique, ou du moins, en aucun cas, ne permet de ressentir l'évolution catastrophique qui est prédite par les modèles climatiques.

Un autre exemple qui a agité le Parlement, il n'y a pas longtemps, c'est celui des pesticides, et en particulier les fameux néonicotinoïdes. Et vous avez déjà, derrière ces pesticides extraordinaires, des effets délétères qui se jouent sur des doses tellement infimes que personne n'aurait parié dessus. On parle de nanogrammes et ce qu'on peut imaginer, c'est qu'un nanogramme va dérégler une abeille. Ce sont des concentrations de produits qui sont de l'ordre de la partie pour un milliardième ou pour un dix milliardième. Ce sont des concentrations tellement infimes qu'il n'y a pas si longtemps, on ne pensait même pas qu'on pourrait les étudier et encore moins qu'elles auraient des effets.

On retombe sur un débat qui est très lié à celui des mathématiques, c'est la question de la précision de la mesure. On sait à quel point, dans notre histoire, et en particulier en France, la course vers la précision des mesures a été quelque chose d'important et de structurant. On le retrouve aujourd'hui dans toutes ces questions écologiques, dans lesquelles des doses infimes, des accumulations de très faibles effets, peuvent avoir des conséquences considérables.

Mais en mathématiques, on les retrouve aussi dans la crise du covid, bien sûr, et à commencer par le facteur limitant majeur dans ces crises, à savoir le nombre de lits de réanimation. Parmi toutes les spécialités qui sont mises en œuvre, une est particulière parce que c'est la seule spécialité dont le boulot est de prédire des choses telles que le nombre de lits de réanimation qui vont être occupés, c'est l'épidémiologie et les modélisations mathématiques associées.

On construit des modèles dans lesquels on cherche à évaluer le nombre de personnes, de sujets qui sont sains ou infectés ou guéris ou morts, etc. Avec toutes les imprécisions et les grandes difficultés qu'on peut avoir, cela reste les seuls outils qui nous permettent d'avoir des prédictions. Et encore là, quand ? Quand la décision a été prise de confiner, par exemple, c'était lié à ce que nous prédisaient les modèles, qui nous disaient : si on ne fait rien, nous avons probablement (jamais une certitude, bien sûr), mais probablement des services de réanimation qui sont saturés à échéance de 3 semaines, etc.

On voit combien c'est présent aujourd'hui, à un point que je qualifierai d'historique. Pour la première fois de tout ce que j'ai pu voir, vous avez des constantes mathématiques dans des modèles qui se retrouvent dans les discours politiques du plus haut niveau, que soit le coefficient de doublement, ou le coefficient  $R$ , le  $R_0$  ou le  $R$  effectif, le coefficient de réplication, le coefficient de transmission de l'épidémie. Cela s'est retrouvé dans le discours d'Edouard Philippe, dans ceux d'Angela Merkel. Bref, ça s'est frayé son chemin dans le discours politique. C'est la première fois que je vois une constante provenant d'un modèle mathématique qui intervient à ce niveau-là, avec même Angela Merkel, vous disant : s'il est à 1,1, notre système de santé sera saturé à tel ou tel horizon. Si c'est à 1,2, il sera saturé à tel horizon et ainsi de suite. On voit là que si l'on est au-dessus ou en dessous de 1, les conséquences que ça peut avoir. Et certains, je pense à en particulier à Tomaz Puyo, ont fait des articles sur la crise du covid, ont montré en termes de ce coefficient comment il fallait penser la dynamique de la crise. Le confinement, c'est le marteau qui vous permet de donner un grand coup sur le coefficient et le faire passer en dessous de 1. Les mesures, les essais, erreurs, c'est ce qui nous permet de voir comment garder le coefficient plutôt en dessous de 1.

On sait, en France, qu'on a perdu le contrôle de la première vague de l'épidémie, de mi-juillet jusqu'au second confinement. Le coefficient  $R$  est resté au-dessus de 1.

On voit sur ces exemples combien des situations parfois complexes peuvent se traduire par la valeur d'un coefficient. C'est très important pour la philosophie et la modélisation mathématique. C'est le souhait de traduire la complexité du monde à travers un modèle, une équation, quelques paramètres qui permettent aux décideurs de se forger une opinion, de savoir quand il qu'il faut agir. La valeur du coefficient  $R$  est l'un de ses ingrédients.

*BB* : Malheureusement, je suis en désaccord avec vous, mais ça correspond à notre différence de personnalité, vu que vous êtes fondamentalement optimiste et que moi, je suis devenu, avec les années, fondamentalement pessimiste. Le dernier mathématicien appliqué qui a réellement travaillé sur les applications, c'était Von Neumann, mort en 1957. C'est l'auteur de la Théorie des Jeux et on ne voit pas très bien, en pratique, ce qu'elle a pu apporter à l'économie ou à la prise de décision. Tout simplement parce que, pour être appliquée, elle requiert des hypothèses qui ne sont jamais satisfaites en pratique. Alors ensuite, comme Von Neumann l'avait annoncé, les choses se sont progressivement dégradées.

Et le sentiment que j'ai moi, depuis une vingtaine d'années, c'est que les politiques ne nous écoutent pas, nous, les scientifiques en général. Les politiques font appel à des modèles mathématiques, comme vous l'avez dit très justement, mais a posteriori et simplement pour justifier des choix qu'ils ont faits a priori. Ils ont pris leur décision et après, ils demandent à quelques spécialistes "faites-moi un modèle qui monte, qui descend, qui donne ceci ou cela, et qui montre que j'ai raison". De toute façon, ils ne nous écoutent pas.

*CV* : Il y a là un bon sujet de débat. Sur la question "comment le modèle se fraie un chemin jusqu'à la décision ou pas", il y a plusieurs choses à dire. La communication entre scientifiques et politiques est toujours difficile et souvent polémique. C'est vrai au niveau individuel, c'est vrai au niveau institutionnel. L'institution de conseils scientifiques au gouvernement marche rarement bien en France. Il y a une kyrielle d'institutions, qui sont censées aider les gouvernants à prendre leurs décisions et qui sont inopérantes. En particulier le Conseil Stratégique de la Recherche, qui est censé conseiller le gouvernement. Cela se voit d'ailleurs dans le fait qu'à chaque nouveau problème, le pouvoir met sur pied un nouveau conseil scientifique spécifiquement pour ce problème, sans faire appel à ceux qui sont déjà là ; le covid est un exemple parmi d'autres.

*BB* : Je me rappelle notre cinquième anniversaire, il y a vingt ans. J'avais organisé une réunion au palais de la Découverte et j'avais invité votre homologue de l'époque, M. Pierre Lellouche, député de Paris. Il a dit "les scientifiques ne nous donnent jamais aucun conseil". Sur quoi nous lui avons répondu : "Monsieur, vous ne nous avez jamais rien demandé". C'était la première fois que je le rencontrais. C'est exactement ce que vous venez dire : la barrière était absolue.

*CV* : La barrière est forte. Il y a des manquements des deux côtés. Le monde d'aujourd'hui ne favorise pas le rapprochement. Je vais conclure ce petit propos liminaire avant de passer aux échanges de questions réponses. Aujourd'hui, le débat est enrichi ou rendu plus complexe par les développements de l'informatique : la caisse de résonance énorme que l'informatique donne à tous les modèles mathématiques. Il y a eu une époque où une décision mathématique était un chiffre, une donnée.

Voici un exemple où on dit que le pouvoir politique a écouté les scientifiques. C'est la politique de natalité chinoise. L'un des scientifiques en charge a calculé les évolutions démographiques possibles de la Chine en fonction du taux de natalité et a convaincu les dirigeants du Parti communiste chinois qu'il fallait se limiter à un enfant par famille, sans quoi on allait vers une situation qui serait intenable.

C'était une époque héroïque, si je puis dire, où les mathématiciens devaient faire leurs calculs tant bien que mal avec papier, crayon, résoudre explicitement chaque fois que c'était possible, chercher le sous modèle qui se résolvait explicitement. Aujourd'hui, n'importe quelle décision est basée sur des simulations informatiques et ceci démultiplie la puissance de l'outil mathématique. Mais, de façon intéressante, l'informatique vient aussi avec, dans certains cas, une façon d'intérioriser la décision : elle donne un algorithme de choix ; dans le temps on parlait de système expert. Maintenant on a des algorithmes d'intelligence artificielle à qui on va demander de faire de l'allocation optimale, de la construction automatique de portefeuilles ou du diagnostic automatique.

Aujourd'hui, les meilleurs algorithmes battent les meilleurs humains dans la reconnaissance du cancer du sein sur des images médicales. Ils décident quel est le meilleur coup à jouer au Jeu de Go, mieux que les meilleurs humains du monde, etc. Il y a toute une série d'actions pour lesquelles l'informatique fait mieux en terme de "décision", entre guillemets, que l'humain.

Je mets des guillemets, parce qu'on peut dire que, par définition, la décision est toujours l'acte d'un être humain. Ce que rend l'ordinateur, c'est un verdict, une analyse. Mais quant à savoir ce que veut dire "décision", c'est un débat subtil, vu la façon dont ces algorithmes d'intelligence artificielle sont calibrés, sont développés, sont mis au point

Ils se basent de façon directe ou indirecte sur la décision humaine, directe si c'est à travers des décisions directes, si c'est fait à partir d'archives (exemple de la justice prédictive), se basant sur des décisions humaines qui ont déjà été prises et qui pourraient être amenées à reproduire des biais de décisions humaines.

Il est rare qu'on ait des algorithmes dans lesquels il y a effectivement un processus d'optimisation qui vise à rechercher quelle est la meilleure décision, mais cela arrive aussi. Et la question se pose toujours de savoir si, dans le futur, dans quelle mesure on pourra voir arriver des systèmes qui viendront mettre au point des décisions meilleures que ce que l'humain aurait pu prendre. C'est une question qu'on m'a déjà posée en tant politique : à quand le politique augmenté ? Celui qui a sa capacité de décision accrue par un algorithme, un logiciel ad hoc. Probablement pas pour tout de suite !

*BB* : Cela ne me choque pas que nous soyons en compétition avec un ordinateur. Mais la question est de savoir par quoi vous l'alimentez. Or, les données qui circulent à l'heure actuelle sont en général incomplètes, souvent biaisées et quelquefois truquées. Et dans ces conditions, quel que soit le moyen de traitement que vous utilisez, "garbage in, garbage out", c'est clair. Je me souviens qu'il y avait un service dépendant du premier ministre, qui s'appelait Etalab, qui avait essayé de rendre publiques un certain nombre de données, des données de santé publique en particulier.



*CV* : Etalab n'a guère donné satisfaction ; il a un successeur dont le nom m'échappe, mais qui s'occupe encore effectivement de la rationalisation et de l'efficacité des politiques publiques.

*BB* : Avant de rationaliser la politique publique, il faudrait faire en sorte que la donnée de base circule correctement, puisse être critiquée, ce qui est un minimum sur le plan scientifique. Je vais vous donner un exemple très concret. Nous avons travaillé pour RTE (Réseau de Transport d'Electricité) il y a quelques années, sur la question de savoir si les lignes à haute tension étaient dangereuses pour la santé et, en particulier, avaient un impact sur la leucémie de l'enfant. Nous avons eu à critiquer un certain nombre d'articles qui faisaient des modèles, comme vous dites. La critique a été très facile : ces articles étaient de très mauvaise qualité. Mais ensuite, j'ai souhaité disposer de données, ce qui est en principe possible parce que la leucémie de l'enfant est une maladie à déclaration obligatoire. On devrait avoir des données permettant de savoir si, chaque année, il y a plus de leucémies là où il y a plus de lignes à haute tension ou si ça varie d'une année sur l'autre alors que les lignes sont fixes. Il s'agit de données complètement anonymes : un nombre par département et par an. On n'a pas besoin de connaître le nom précis de l'enfant ni son âge précis. Je n'ai jamais réussi à obtenir ces données, malgré plusieurs tentatives, dont une via EDF.

C'est systématique. Pour tout ce qui relève de la santé publique (et c'est vital dans les descriptions que vous faites), les données ne sont pas publiques. Les seules qui soient fiables sont les données de mortalité de l'INSEE, avec un recul d'un mois. Ce n'est pas suffisant pour travailler.

Donc, avant de se préoccuper de la validité de l'ordinateur ou des modèles, il faudrait se préoccuper de la validité des données qui sont mises en circulation. Maintenant, le grand jeu consiste à truquer les données, à faire ce qu'on appelle des "fake news" au sens le plus américain du mot. Sur tous les sujets, on réécrit l'histoire : on ne sait plus où Jeanne d'Arc est morte. C'est devenu un sport national que tout réécrire.

*CV* : Je crois que nous en avons dit assez, cher Bernard, pour cette introduction et je vois qu'il y a un certain nombre de questions sur le fil de discussion. Il y en a une sur les applications de la Théorie des Jeux. Sur les questions d'enchères elle a été effectivement utilisée : la mise en concurrence dans les télécoms, les attributions de fréquences, sont l'un des exemples les mieux documentés d'application dans la sphère publique. Il n'y en a pas tant que ça.

*BB* : Tout à fait. C'est une très belle théorie. Je suis un grand admirateur de Von Neumann qui a fait énormément de choses en mathématiques appliquées, les bases et les fondements de la mécanique quantique, etc.

*CV* : Oui, c'est Von Neumann et Morgenstern, pour la Théorie des Jeux.

Je vois une question sur la compétence de la représentation nationale, du Parlement ou des députés, à appréhender les modèles mathématiques: faire une revue critique des hypothèses, de la robustesse, des résultats, des structures, des modèles face à un problème, etc.

Il y a au Parlement ni plus ni moins de compétence mathématique que dans la population en général. Donc, on trouve des parlementaires qui sont assez affûtés sur ce genre de choses et d'autres qui ne sont pas du tout. Et les deux sont légitimes, du moment que chacun est conscient de cela.

Il y a, au Parlement, une structure qui s'appelle Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques, OPECST, que je préside. Elle comporte 18 députés et 18 sénateurs. Le métier de cette structure, c'est d'instruire des dossiers à l'interface entre scientifiques et politiques, avec des auditions publiques, des notes courtes, des rapports. Quand il y a des rapports, ce sont les parlementaires qui en sont responsables et qui les présentent, mais ils ont été travaillés avec le secrétariat scientifique en amont, bien sûr.

En ce moment, par exemple, nous venons nous emparer du sujet de la stratégie vaccinale : c'est nous qui sommes chargés de faire des recommandations au Parlement. Ce sont des recommandations de recommandations, au sens où le Parlement va contrôler le gouvernement comme c'est son boulot, poser des questions, rendre des comptes et adopter une ligne parlementaire par rapport à ces sujets. Et c'est notre boulot, à l'OPECST, que d'instruire le dossier autant que possible et d'instruire le Parlement sur ce qu'il convient de contrôler, sur ce qui nous semble être des points forts ou faibles de stratégies à venir. Nous travaillons sur tous les sujets. Par exemple, nous avons sur le feu en ce moment des questions telles que la pollution plastique, l'intégrité scientifique en général, l'impact du covid sur la société, et des thèmes aussi variés que les cultes, les religions. Pour rester sur l'interface avec la religion, nous avons fait des auditions spéciales sur le rôle des sciences et technologies dans la reconstruction de Notre-Dame de Paris. Nous avons des auditions très régulières, depuis notre création, sur le monde nucléaire, etc. Donc, cet organe est censé faire la courroie de transmission entre le monde scientifique et le Parlement et qui lui-même a des liens avec les Académies des sciences, de médecine, des technologies, et d'autres organismes, soit politiques, soit scientifiques, en France et à l'étranger.

*BB* : Cédric, la presse ne rend jamais compte des travaux de l'OPECST.

*CV* : C'est exact. Cela devrait changer maintenant que je suis président. Je le suis depuis peu. J'ai été un très éphémère président en début de mandat, puis la présidence est passée au Sénat. Maintenant que la présidence est revenue à l'Assemblée nationale, j'ai repris la casquette de président et je compte bien travailler pour que l'on parle davantage des travaux de l'OPECST. A commencer par ce sujet très médiatique sur la question vaccinale, avec beaucoup de pressions politiques ou sociétales.

Un autre exemple est la doctrine relative au nombre de masques en France, celle qui dit qu'il faut avoir en réserve un milliard de masques. Elle a été mise au point par un rapport de l'OPECST il y a une quinzaine d'années, je pense. Elle n'a pas été bien appliquée, en particulier pour des raisons administratives et logistiques, mais c'est autre chose.

*BB* : Vous prenez l'exemple de la vaccination. J'ai du mal à voir quel est l'apport des mathématiques, parce que, premièrement, on ne connaît pas l'efficacité de cette vaccination. Deuxièmement, la maladie est bénigne pour la plupart des gens, donc ils n'auront pas besoin de se faire vacciner. Enfin, il est très possible que le vaccin ait des effets secondaires bien pires que

le virus : on n'en sait rien. Il y a énormément d'inconnues. Comment voulez-vous appliquer à cela un raisonnement scientifique ou rationnel? Tout ce qu'on pourrait faire, si j'avais un rôle de décision, c'est proposer qu'on fasse une expérimentation sur un petit nombre.

*CV* : Certains vaccins sont en cours de développement et ont atteint la phase 3. Quand vous entendez parler du vaccin de Pfizer, du vaccin de Moderna, du vaccin russe, ce qui est mis en avant, c'est un chiffre d'efficacité, de protection. Cela passera par des modèles épidémiologiques en particulier. Une question qui est qui va être posée, c'est quelle proportion de couverture vaccinale on vise. Est ce qu'on veut avoir un taux de couverture d'au moins 50%, ou 60%, ou 95% ? Cela correspondra à des stratégies différentes. Quand le gouvernement a décidé, il y a 3 ans, que tout un paquet de vaccins pour l'enfant serait obligatoire, c'était lié à des baisses de taux de couverture qui étaient à mettre en rapport avec ceux attendus pour enrayer les épidémies. Tout cela relève de l'épidémiologie, donc c'est au confluent entre médecine et mathématiques, même si effectivement, après, il y a toutes sortes d'incertitudes et la biologie est particulièrement forte pour nous amener tout son lot d'incertitudes.

Il y a d'autres questions dans le fil sur le covid, vu comme un problème de prédiction et de commande d'un système à retard. C'est un problème difficile, à cause de la durée de transmission asymptomatique. Quand vous détectez quelqu'un qui est positif au covid, cette personne a eu toutes les chances d'avoir déjà transmis la maladie à quelqu'un d'autre. Vous ajoutez la période de contagion, la période asymptomatique, la période symptomatique et puis la période dangereuse, qui d'habitude est celle où la réaction immunitaire inflammatoire très violente se déclare. Vous aboutissez à quelque chose qui est de l'ordre de deux semaines.

N'importe quelle décision que vous prenez se traduit alors avec deux semaines de retard. Mais le virus est à l'instant  $T$  ; vous décidez du couvre-feu et c'est seulement deux semaines après l'instant  $T$  que vous pourrez voir si votre mesure de couvre-feu fut efficace ou pas. Mais, dans l'intervalle, le virus a pu évoluer. La propagation du virus dépend de paramètres : la température, la météo, les habitudes des gens qui peuvent évoluer d'une semaine à l'autre. Vous êtes dans la situation très désagréable où votre pays est dans un certain état de mesure, par exemple, le couvre-feu, et vous devez décider si vous allez un cran plus loin, un cran moins loin, sans avoir les résultats de l'état actuel. C'est un vrai problème de système avec retard et c'est extrêmement désagréable. Cela amène une dose d'incertitude forcée. Par exemple, début novembre, les pouvoirs publics se retrouvent dans la situation où il y avait déjà eu un peu de couvre-feu. Ils ne pouvaient pas savoir quelle était l'efficacité de ce couvre-feu. Mais si jamais il n'avait pas été efficace, alors on courait à une saturation des réanimations aux alentours du 15 novembre. Les épidémiologistes qui avaient travaillé là-dessus (il y avait accord entre différentes équipes) avaient préparé différents scénarios : un dans lequel le confinement, le couvre-feu, n'a eu aucun effet, un dans lequel il était un peu efficace et un où il a été très efficace. Ils se voient dans la désagréable situation de remettre ces conclusions aux pouvoirs publics en disant : voilà, on ne sait pas. Il y a une chance sur trois que soit comme ceci, deux chances sur trois que ce soit comme cela. Mais il faut prendre la décision quand même.

Est ce qu'on prend le pire? En 2009, quand est arrivé le problème H1N1, Roselyne Bachelot, encouragée par Nicolas Sarkozy, avait choisi de parer la situation la pire, avec des dépenses massives. Avec du recul, on voit bien que c'était une bonne décision. Mais, à l'époque, cela avait été très critiqué.

Finalement, le virus n'était pas si virulent ; il l'était beaucoup moins en Europe qu'il n'avait été en Asie. Et c'était resté dans l'inconscient collectif que des milliards avait été gaspillés par la puissance publique à cause de cela. Maintenant, les milliards qui ont été perdus se comptent par dizaines. On avait raison de prévoir le pire. Mais ce n'est pas forcément quelque chose qui est facile à expliquer à la population.

*BB* : Les gens n'ont pas le sens de l'évaluation du risque. Pour eux, n'importe quel désagrément doit être évité, quelle que soit la quantité d'argent qu'on met. Dans ces conditions, la décision politique n'est plus possible. On ne pèse pas quelque chose. On prend simplement la situation de la peur, réelle ou supposée, et on essaie de remédier à ces peurs par une quantité d'argent qui est aussi élevée que nécessaire.

*CV* : Il y a une autre question sur le fil qui demande si le conseil scientifique a été associé étroitement à la gestion du Covid.

Cela a fluctué : à certains moments, il a été très soigneusement suivi, à d'autres moments, le pouvoir politique est allé à l'encontre de ses recommandations. Par exemple, sur la réouverture des écoles, le conseil scientifique a déconseillé, en disant qu'on ne savait pas. Mais le pouvoir politique a pris la décision de la réouverture des écoles après le premier confinement. En l'occurrence, le politique a bien arbitré, selon moi, parce qu'il a mis en balance les questions sanitaires avec les questions de bien-être de la population, les questions économiques aussi. On a vu dans le premier confinement et encore plus, avec le recul, toute la kyrielle de problèmes psychologiques et de problèmes de scolarisation qui sont arrivés, avec plein de gamins hors système. La question des écoles est importante, elle ne peut pas se juger, se jauger, seulement à l'aune sanitaire. Et ça, c'est une question délicate politiquement.

Vous voulez faire entendre la voix des scientifiques, mais en la mettant en balance avec des questions sociétales ou des questions parfois irrationnelles. Je prends un autre exemple. La vaccination qui viendra pour le covid, même si le vaccin s'avère très efficace. Le pouvoir politique ne va certainement pas prendre le risque de décréter une vaccination obligatoire. Le président l'a annoncé hier : jamais je ne rendrai le vaccin obligatoire. La raison est qu'il y a déjà un tel niveau de complotisme exprimé par la société que les vaccins obligatoires viendraient renforcer la théorie du complot et auraient peut-être même un effet contraire.

On peut même utiliser le covid comme une métaphore ou un exemple pour beaucoup de problèmes, y compris bien plus graves. À terme, le problème environnemental sera sans comparaison en termes d'impact, de nombre de morts, et tout ce que vous voulez, par rapport au covid. Mais on a un peu les mêmes questions : le retard des effets, le fait qu'il faille mettre en balance des questions scientifiques, des questions sociales, etc.

Depuis mi-juillet, la France a perdu le contrôle de l'épidémie covid. Est-ce que ça s'est ressenti dans les discours politiques de l'été ? Non, et dans la société non plus. On a entendu plein de gens dire : il faut vivre, finalement tout ça est à mettre en perspective et à relativiser, etc. Laissons nos jeunes faire ce qu'ils veulent.

Le conseil scientifique a dit très clairement "nous sommes en crise". Ils l'ont dit en août, en septembre, en octobre et c'est seulement fin octobre que le pouvoir politique a répondu. Donc,

pendant toute cette période-là, le pouvoir politique était sur une ligne plus rassurante que le conseil scientifique.

*BB* : Je ne suis pas sûr que le covid soit un bon exemple pour tester la validité des mathématiques ou la validité d'une approche scientifique en général, dans la mesure où c'est quelque chose de trop récent. La bonne stratégie, à mon avis, c'est celle de Didier Raoult. On accueille les patients, on traite ce qu'on peut traiter de la manière dont on sait traiter et on s'efforce de ne pas faire de modèles mathématiques. C'est un homme de terrain et il fait ce qu'il sait faire.

*CV* : Nous sommes en désaccord sur Didier Raoult. Je pense qu'il n'y a eu que des effets négatifs sur cette crise et qu'il s'est trompé du début à la fin.

*BB* : Nous prenons acte de notre désaccord. Il y a un grand nombre de situations dans lesquelles les risques sont très anciens : séismes, tempêtes, etc. On a l'impression que l'analyse de ces risques, qui relève du pouvoir politique ou de l'Observatoire des choix scientifiques et techniques, est mal faite. Quand quelque chose se produit, on a l'impression qu'on découvre cela pour la première fois alors que nous sommes un très vieux pays. Ça fait deux mille ans que ces risques existent. On devrait avoir recensé correctement les inondations, les incendies, les secousses de toute nature, savoir quelle est leur durée de retour et se prémunir avec des outils appropriés en fonction de la gravité et de la durée de retour.

Or, cela n'est pas fait, alors que ce serait rationnellement possible, par l'analyse d'un historique. Cet historique existe en général, mais il n'est pas exploité. Je vais vous donner un exemple très concret. Près de Naples, il y a deux volcans. L'un est le Vésuve et l'autre, j'ai oublié son nom. Tous les deux ont eu des éruptions au cours du 20ème siècle. Cependant, plusieurs millions d'habitants ont leur résidence entre les deux volcans. Si les volcans devaient faire à nouveau éruption, on ne pourrait pas évacuer ces millions d'habitants. C'est clair qu'il y a un problème de perception du risque par la population dans la région de Naples.

*CV* : On est là sur des échelles de temps de retour qui sont bien plus grandes que les durées que vous indiquez, pour les habitations, etc. Il est intéressant d'avoir justement des modèles mathématiques qui vont au-delà de l'intuition.

*BB* : Ce serait une bonne idée. Un autre exemple : il existe une cartographie du risque sismique en France ; elle est plutôt mal faite et nous avons eu l'occasion de la critiquer. Mais, au moins, elle sert de base à la décision. Peut-on ou non construire une centrale nucléaire à tel ou tel endroit ?

*CV* : Dans le fil de discussion, Simon Postec dit les modèles ne satisfont pas au critère de réfutabilité de Popper. En effet, ils portent sur des phénomènes pour lesquels l'expérimentation à échelle réelle est difficile, voire impossible. C'est le cas pour le covid. Impossible de faire une expérimentation sur le climat, ou sur toutes les questions liées à l'écologie.

Il y a quand même la possibilité sur ce genre de modèles de faire des prédictions à l'envers. En faisant tourner les équations à l'envers, on vérifie que l'on retrouve les conditions climatiques d'il y a un siècle, dix siècles, des millénaires, etc., et que cela s'accorde bien.

*BB* : Ce n'est pas le cas en général.

*CV* : On a aujourd'hui de très bons accords, dans les modèles de climatologie, avec des travaux, comme ceux de Valérie Masson-Delmotte ou d'autres, qui se sont spécialisés sur le paléoclimat. On sait en tout cas bien mieux faire sur les questions géologiques que sur les questions biologiques.

*BB* : C'est vrai, mais en ce qui concerne la pertinence de ces prédictions, voilà un deuxième point de désaccord entre nous.

*CV* : Quelqu'un nous dit : Roselyne Bachelot n'a-t-elle pas simplement appliqué le critère de minimax-regret ? Oui, on peut dire ça. Il n'y a pas de règle générale sur le critère qu'on doit appliquer. Cela dépend : est-ce une situation unique, ou survient-elle fréquemment ? Selon les cas, le critère que vous voulez appliquer va changer.

L'enchaînement des faits en 2009 a eu un impact négatif sur la façon dont on a pris la chose en 2020. En 2020, quand les prédictions alarmistes sont arrivées, certains des scientifiques et des hauts fonctionnaires et l'administration se sont dit : Attention ! C'est consciemment ou inconsciemment. Si jamais nous faisons des prédictions alarmistes et qu'on dépense encore plus d'argent, nous allons le faire clouer au pilori. Espérons que ça va être comme la dernière fois et que ça va être une version atténuée.

Cela nous a amenés à sous-estimer l'ampleur du problème. Je vous rappelle que les pouvoirs publics ont tellement peu pris au sérieux au début le covid qu'ils ont quand même lancé le premier tour des municipales, alors que les prédictions mathématiques nous indiquaient qu'on allait être en saturation totale dans l'entre-deux tours.

Même au CNRS, ils ont maintenu leur concours de mi-mars, presque jusqu'à la dernière minute, avant que ça devienne rigoureusement impossible. Trois jours avant le confinement, vous aviez encore des médecins français parmi les plus réputés qui disaient : mais non, nous n'aurons pas besoin de confiner. Nous sommes meilleurs que les Italiens. On a bien traité le covid jusqu'à présent et on va bien le traiter. Ne vous inquiétez pas, on ne va pas être réduits, comme nos amis nord italiens, à se confiner.

*BB* : Cédric, les pays qui ont confiné ont eu beaucoup plus de morts par million d'habitants que les pays qui n'ont pas confiné. C'est une réalité statistique qu'on peut établir en novembre.

*CV* : Excusez-moi, Bernard, toutes choses comparables par ailleurs, je vais le retourner dans l'autre sens. Les pays qui se sont mieux débrouillés, parce qu'ils se sont mieux débrouillés, n'ont pas eu besoin de confiner. La stratégie coréenne a été appliquée avec une très grande efficacité ; ils n'ont pas eu besoin de faire un confinement. Ce n'est pas faute d'avoir essayé en France, de mettre sur pied une telle stratégie. L'efficacité était beaucoup moindre et les outils informatiques ont été moins performants, pour des questions de respect, de la vie privée et autres.

En Afrique, c'est encore différent. L'Afrique, effectivement, est globalement épargnée. Pourquoi, ce n'est pas complètement clair. Il y a peut-être des questions climatiques qui jouent. Il y a peut-être des échecs, et des questions de transmission et de communication.

Mais si on veut voir un endroit où ça a été le chaos, il suffit d'aller en Amérique du Sud où là, ils n'ont pas confiné ou peu ou très mal, et où cela a été un carnage : des fosses communes, des systèmes de santé absolument débordés. Allez voir comment l'épidémie s'est passée à Manaus. C'était vraiment apocalyptique. Je pense que c'est un bon exemple de pays, de situation, dans lequel le confinement a été calamiteux.

*BB* : C'est possible, mais de toute façon, je considère que la question du covid n'est pas un bon sujet pour nous départager, en ce qui concerne l'efficacité et la validité des raisonnements mathématiques. Il y a trop d'inconnues. On peut construire n'importe quel modèle dans n'importe quel sens, à tort ou à raison. Attendons que ça soit fini. Attendons d'avoir des données. On verra bien comment il aurait fallu s'y prendre. Rétrospectivement, on doit pouvoir faire des analyses critiques.

J'ai été professeur d'université pendant 16 ans avant de créer la SCM, qui date de 1995. Ce qui m'inquiète, c'est le déclin de l'esprit scientifique, en particulier chez les jeunes. Maintenant, vous voyez bien dans la presse, tout le monde s'engueule à propos de n'importe quoi. Ce sont des querelles de religion. Il est devenu impossible, de manière générale, d'échanger des arguments rationnels sans se faire engueuler, sans se faire traiter de ceci ou cela. Il y aura un travail à faire, et le pouvoir politique peut y contribuer, pour essayer de renouveler l'approche rationnelle en général auprès de la population. Que les gens aient moins peur, qu'ils essaient de mieux se documenter sur la manière dont les choses se passaient il y a 50 ans, il y a 150 ans.

On a l'impression, par exemple, à entendre les jeunes à l'heure actuelle, que la planète est condamnée dans les 20 minutes qui viennent. C'est devenu totalement absurde. Il y a une peur devenue irrationnelle. Les gens ont peur de tout. Ils voient un morceau de plastique sur le trottoir. Ils disent ouh lala, il faut arrêter le plastique ! Ils ne réfléchissent pas. Il y a des tas d'interdictions de toute nature pour des produits de première nécessité. On ne sait pas quoi mettre à la place, mais on décide d'interdire, car tous les jeunes d'aujourd'hui sont absolument convaincus que la planète est menacée à très court terme. Cela m'inquiète, non pas pour la planète, mais pour eux.

*CV* : Ce qui est certain, c'est que le débat en général est extrêmement tendu.

*BB* : Pourquoi est-il tendu? Ce ne sont pas des problèmes qui se posent dans l'instant. On a le temps d'y réfléchir. On a le temps de discuter. Pourquoi faut-il que toutes les décisions soient instantanées ?

*CV* : Prenons un exemple qui n'est du côté d'aucun groupement d'intérêt. C'est le sujet de la biodiversité. Toutes les mesures liées à la biodiversité montrent un effondrement fort depuis les années 70 environ. Ces mesures, qui ont été un vrai choc en termes de biomasse des insectes, font état d'une réduction de deux tiers à trois quarts sur les 25 dernières années. Je parle de la France, de l'Allemagne, de l'Europe occidentale. Et c'est l'un des nombreux

exemples de constatation de réduction de biodiversité. Il y a un organisme international, l'IPBES, qui est l'équivalent pour les espèces du GIEC pour le climat. Il rend son rapport très régulièrement et chaque rapport est pire que le précédent. Il n'y a pas eu un exemple où on ait vu d'un rapport à l'autre une amélioration à l'échelle mondiale de la biodiversité, que ce soit sur les vertébrés, sur les invertébrés, dans les mers, sur terre, etc. On est arrivé au stade où, si l'on regarde les mammifères terrestres, 96%, je crois, c'est l'homme et ses animaux domestiques, ses animaux d'élevage. Il reste 4% pour les mammifères sauvages.

*BB* : Cela ne me surprend pas outre mesure. On a colonisé l'Europe, on a fait des champs, on a créé des usines. Il y a des vaches dans les champs et des chiens à proximité des maisons. Chaque espèce animale crée son écosystème. Si cela revient à renvoyer les tigres quelque part dans le Bengale, c'est le problème des tigres et non le mien. J'ai tendance à dire que je m'en fous, en vérité. En plus, on ne compte pas correctement. Il y a eu des situations d'effondrement de la biodiversité par le passé, qui étaient beaucoup plus vigoureuses que ce que nous connaissons à l'heure actuelle.

*CV* : Il y en a eu exactement 5. La dernière était il y a 65 millions d'années. C'était le moment de la crise crétacé tertiaire. Mais je pense que c'est une situation potentiellement dramatique, parce que cela aboutit à la disparition d'un certain nombre d'espèces. Ce sera dramatique pour l'humanité aussi, à terme. Rien n'a pu être mis en place en terme d'organisation internationale pour enrayer cela.

*BB* : Dans Paris, il apparaît plein de rats : c'est une nouvelle espèce. Il apparaît aussi une énorme quantité d'imbéciles, c'est une nouvelle espèce également. Moi, ça ne me dérange pas. Je vois de la biodiversité partout.

*CV* : C'est votre côté optimiste, Bernard ? Oui, vous voyez la biodiversité partout. Mais rien ne remplacera la disparition de telle ou telle espèce de grands primates qui aujourd'hui sont tous menacés.

*BB* : Ça m'inquiète plus de voir la disparition des restaurants dans la rue de La Boétie que de voir la disparition des dinosaures au moment de l'ère tertiaire. La disparition des dinosaures, je m'y suis habitué. J'ai envie de retourner votre argument : quand la Nature veut faire disparaître une espèce, qui sommes-nous pour nous y opposer ? De toute façon, elle la fera disparaître, avec ou sans notre consentement.

*CV* : Sauf que là, ce n'est pas la Nature, c'est nous qui la faisons disparaître.

*BB* : OK, avec l'aide de la Nature. Le jour où elle en aura marre, elle nous le dira et elle ne nous a encore rien dit. Nous sommes en train de trouver des verges pour nous fouetter nous-mêmes. La Nature, jusqu'à présent, ne s'en est pas prise à l'espèce humaine, qui continue à croître et à se développer tranquillement. On vit plus vieux que par le passé et on est plus nombreux que par le passé. Il n'y a aucun signe qui nous dise que la Nature en a marre de l'espèce humaine. Au contraire, le paradis terrestre est où je suis, comme disait Voltaire. Avant qu'on ferme tous les restaurants de la rue de la Boétie.



*CV* : Je pense que ça nous fait encore un petit désaccord. Il faut qu'on remette le débat sur les rails : applications des mathématiques à la décision. Comment faire ? Je ne vois pas de questions dans le fil de discussion.

*BB* : Je peux donner un exemple. J'avais un ami qui était PDG d'Aéroports de Paris à une époque. Il y a eu une vague de froid, et les avions sont restés coincés au sol à cause de la neige. La ministre est venue visiter Aéroports de Paris et s'est mise à engueuler mon ami, en lui disant : comment, vous n'avez pas de glycol ? Vous devriez en acheter plein, parce que cela permet de dégivrer les avions. Il a obéi, mais le glycol a une durée de validité de deux ans, et la vague de froid était très exceptionnelle. Il s'est retrouvé avec un énorme stock de glycol dont il n'a pas su quoi faire. C'était une mauvaise évaluation des risques.

Est-il utile, en particulier, d'avoir des chasse-neige dans Paris ? On ne les utiliserait que quelques jours par an et il faudrait les entretenir. En l'occurrence, le politique a fait le bon choix : nous n'avons pas de chasse-neige. Mais, bien souvent, on se dote de moyens de lutte contre des périls qui sont imaginaires ou au mieux, très rares.

*CV* : Nous avons ici deux questions qui reviennent sur les questions mathématiques, la méthode de randomisation pour des mesures économiques et sociales. Nous avons, en sciences économiques et sociales, beaucoup de débats et parfois des théories compliquées sur les façons de randomiser.

C'est très compliqué, quand vous avez des questions économiques et sociales, de les départager des questions culturelles. Un médicament agit à peu près de façon similaire selon que vous l'appliquez en Asie, en Europe, en Afrique. Une mesure économique agira de façon très différente en fonction du continent, du pays ; elle correspondra à des cultures différentes.

Cependant, vous avez des travaux sur l'évaluation des influences de la cognition et de la culture sur les questions économiques. Je vous renvoie à la très célèbre série de travaux concernant les deux systèmes de pensée "Thinking Fast and Slow", les expériences de Dan Caldman et de ses collaborateurs. Il y a eu un prix Nobel d'économie là-dessus. Je vous rappelle les travaux de Caldman et de Sverski, dans lesquels une grande partie de la difficulté revient à mettre les sujets sous une forme qui se prête à l'expérience, par exemple ce fameux effet "Florida" (une façon statistique de mesurer et de voir les choses), qui vous montre que le simple fait d'utiliser un vocabulaire sémantique associé au grand âge vous fait vous voir plus lentement, vous fait vous sentir comme si vous étiez dans le grand âge.

*CV* : Un commentaire est particulièrement virulent sur les questions liées à Raoult. Je vous renvoie aux publications de l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques sur la question de la médecine. Notre office n'a aucun conflit d'intérêt sur quoi que ce soit. Il consulte toutes les voix en France et à l'étranger. Et sur les questions du covid telles que j'ai pu les évoquer, tout ce que je l'ai dit est corroboré par les consensus internationaux.

*BB* : Pourrions-nous aborder un sujet plus général ? Nous sommes d'accord sur le fait que, de toute façon, les mathématiques peuvent jouer un rôle. Comment pourrait-on améliorer ce rôle ? Comment pourrait-on faire en sorte que la population, dès son enfance, dès l'école primaire, ait un meilleur accès au raisonnement rationnel et aussi, faire en sorte que les données dont ils peuvent avoir besoin, sur quelque sujet que ce soit, soient mieux disponibles ? Nous, par

exemple, nous avons fait travailler des lycées, des classes de première, sur des sujets de société, comme la place de l'automobile dans la société. Quand nous avons abordé un tel sujet avec les gamins, leur première réaction a été : il faut supprimer toutes les automobiles, sauf celle de mon papa qui m'amène à l'école.

*CV*: Le gamin est un excellent terrain pour instiller le raisonnement scientifique. Il ne fait pas de doute que des actions telles que "la main à la pâte", dans la foulée de Georges Charpak et Pierre-Gilles de Gennes, avec un travail sur la formation des enseignants et un travail en mode projet interdisciplinaire, dès le plus jeune âge, avec une démarche expérimentale bien en avant, est salutaire.

*BB* : Avez-vous les moyens, politiquement, de favoriser de telles approches ? Gilles de Gennes a fait cela après son prix Nobel, pendant un an ou deux, puis il en a eu marre et il a arrêté.

*CV* : Effectivement, il a dit que cela lui prenait trop d'énergie par rapport à ses missions scientifiques. En revanche, Charpak a insisté beaucoup plus. Au sein de l'Académie des Sciences, je fais partie du groupe qui suit "La main à la pâte" ; c'est une fondation abritée par la Fondation de l'Académie des Sciences.

Cela rejoint un autre débat, celui de l'apprentissage de l'informatique et de l'algorithmie, dès le plus jeune âge. On peut apprendre les rudiments de l'informatique et l'algorithmie dès le CP, et c'est autre chose que d'apprendre le fonctionnement des outils informatiques.

*BB* : Y compris les apprendre de manière critique. Quand vous mettez des données incorrectes à l'entrée, vous obtenez un résultat précis en sortie, mais incorrect. On voit beaucoup d'utilisations de l'informatique qui servent à cautionner des décisions erronées. Ce sont d'énormes modèles, des boîtes noires. On ne sait pas comment ils fonctionnent, mais ils donnent tel résultat en sortie et personne n'est capable d'analyser la validité du modèle.

*CV* : L'apprentissage de l'esprit critique est fondamental et l'esprit critique en informatique aussi. Prenons un exemple célèbre : ce statisticien qui a été chargé pendant la guerre de travailler sur les dégâts causés aux avions. Un avion part au combat et revient amoché de diverses manières. On peut choisir de renforcer le blindage aux endroits stratégiques. Si on renforce le blindage partout, l'avion devient impossible à manier.

Il faut trouver quels sont les endroits stratégiques sur lesquels il faut renforcer le blindage. L'approche statistique naïve consistait à faire les statistiques comptabilisées : où est-ce que les avions qui revenaient étaient le plus souvent touchés, et décider de les protéger à ces endroits. Le statisticien, dans un éclair de génie, a compris que, au contraire, il fallait recenser les blessures des avions qu'on ne voyait jamais revenir : ce sont des blessures fatales.

*BB* : Mais vous n'avez pas de données à ce moment-là. Vous ne savez pas où il a été touché puisqu'il ne revient pas.

*CV* : Exactement. Là encore, la décision est difficile. La décision statistique est toujours très difficile et contre intuitive. En mathématiques, il y a deux sujets qui sont difficiles en terme d'interprétation, c'est l'infini et les probabilités.

*CV* : On me demande de lister les applications. Je pense qu'on en a listé quelques dizaines, dans la discussion, depuis Archimède jusqu'à l'époque moderne. Si on veut faire une liste, on en trouvera littéralement des milliers. Il y a quelques années, un petit bouquin est paru, édité par "Images des Mathématiques". Le site web associé est un site de vulgarisation mathématique dans lequel il y a une centaine de petits textes, dont chacun illustre une application mathématique ; par exemple, la mesure de la biodiversité dans un environnement, ou la détermination de la forme de la terre, etc.

*BB* : Il y a quelques années, nos collègues du monde académique avaient payé un cabinet de conseil pour essayer de déterminer quelle était la part des mathématiques dans le PIB. Comme le cabinet était grassement rémunéré, il avait dû trouver 50%. J'avais dit qu'on pouvait aller au-delà. Par exemple, si on regarde les lunettes, il y a 80% des gens qui en portent, et, par conséquent, le rôle des lunettes est de 80% du PIB.

*CV* : Je me souviens de cette étude qui avait été commandée par l'AMIES.

*BB* : Il nous reste 8 minutes ; je vous laisse les utiliser pour développer les thèmes que vous souhaitez, étant entendu que vous pouvez aborder tous ceux avec lesquels je ne suis pas d'accord, je ne vous contredirai pas. Profitez-en !

*CV* : Sur la question mathématique et applications, il y a une spécificité française incontestable avec une discipline qui, en France d'abord, est très efficace. Les mathématiques sont la discipline dans laquelle la France a le plus grand impact. C'est une discipline qui s'est fondée sur une base très abstraite. La France est certainement le pays où la tradition mathématique est la plus abstraite, à l'exception du Japon et de la Corée.

*BB* : Et de la Russie je crois aussi.

*CV* : La Russie est un pays de tradition beaucoup plus récente que la France et s'est développée sur une base moins abstraite, même si les deux pays se sont énormément influencés l'un l'autre. En particulier, l'influence de Henri Poincaré a été considérable sur la mathématique russe dans son ensemble. La palme revient à la France. C'est au 20<sup>e</sup> siècle que la mathématique russe a été la plus la plus exceptionnelle et elle s'est retrouvée souvent associée à des questions liées au pouvoir.

Kolmogorov a eu un rôle fondamental dans l'organisation de l'enseignement dans son pays. Mais avec Landau, Kantorovitch et d'autres, les scientifiques russes ont joué un rôle considérable, bien sûr, dans la mise au point de des armes modernes russes, le développement de l'arme nucléaire, entre autres, mais aussi dans toute l'organisation. Vous pouvez lire un ouvrage complètement singulier qui s'appelle "Red Plenty" [traduction française : Capital Rouge, de Francis Spufford]. C'est un ouvrage dont Kantorovitch est l'un des héros. On voit les mathématiques appliquées, l'optimisation à l'œuvre dans l'économie russe. On voit la grandeur et la misère de l'économie russe, la façon dont la planification est au début une arme extraordinaire pour faire grimper l'économie russe et la croissance et à la fin, s'écroule, en particulier à cause de deux paradoxes, les dilemmes du prisonnier réitérés à de nombreuses échelles et tout

ce qui fait que la planification s'applique très mal à l'échelle d'un pays. On voit ici aussi à quel point le monde des humains peut se comporter de façon différente du monde naturel.

Il y a dans le fil de discussion une remarque sur l'utilisation d'indicateurs comme le PIB ou l'indice de prix : ce sont des constructions mathématiques. C'est vrai, avec deux remarques. La première, c'est qu'on sait bien que le PIB est une mesure qui a le mérite d'exister, mais qui est extrêmement trompeuse. Il n'y a aucun meilleur moyen de gonfler le PIB que de lancer une bonne guerre. L'augmentation du PIB en soi n'est certainement pas un objectif.

L'autre remarque que l'on va faire, c'est que la tradition économique française est marquée par un grand usage d'outils mathématiques théoriques, parfois utilisés à bon escient, parfois moins. Mais cela fait partie des réputations de l'économie française sur la scène internationale.

*BB* : Merci d'avoir deviné que je ne serai pas d'accord avec vous.

*CV* : Je m'en doutais bien, cher Bernard. Nos dirigeants utiliseront-ils un jour les mathématiques pour gérer les finances de la France ? Cela dépend. Le Parlementaire en général a un bagage mathématique qui lui interdit même les fonctions continues. En fiscalité, on n'utilise que des fonctions constantes par morceaux. Il y a la tranche à 15%, à 25%, etc. La notion de fonction continue n'a pas percolé jusqu'à présent. A chaque fois qu'une fonction de décision est utilisée, on arrive toujours à des approximations ultra grossières. Pourtant, il y a des calculs sophistiqués qui sont faits derrière la gestion de l'économie.

Là où c'est l'orgie de modèles mathématiques, bien sûr, c'est dans la finance, en particulier la finance haute fréquence. Ce n'est pas un hasard si l'un des financiers les plus les plus légendaires du vingtième siècle est un mathématicien. Je parle de Jim Simmons et son célèbre fonds "Renaissance" avec un rendement extraordinaire. C'est le premier qui ait commencé par une carrière de mathématiques de haut niveau et qui a continué par une carrière de financier du plus haut niveau possible. On peut discuter de la finalité. On peut discuter de la philosophie, du trading haute fréquence, de la stabilité qui vient avec tout ça. Mais l'efficacité qu'il a manifestée est juste phénoménale.

Nous en avons terminé avec ce débat sur la formation des mathématiciens, les mathématiques appliquées et les réelles applications des mathématiques dans le monde industriel.

Il est clair que la définition des applications en France est singulière. J'ai fait ma carrière scientifique, au début, dans les équations aux dérivées partielles, équations de Boltzmann et c'est considéré en France comme mathématiques appliquées ; dans à peu près n'importe quel autre pays, ce serait considéré comme mathématiques pures. La question de ce qu'on considère comme appliqué dépend de l'année, de la culture, de la période, du contexte. Il est certain qu'avoir davantage de situations pratiques, de mises en application et de problèmes pratiques à résoudre, y compris venant de l'industrie, serait profitable.

L'exemple de Leonid Kantorovitch, qu'on peut prendre pour référence, ou l'exemple d'Alan Turing que vous évoquiez tout à l'heure, cher Bernard, sont des exemples magistraux. Ce sont deux personnes qui commencent de façon très abstraite, puis se retrouvent face à un problème

très concret et développent toute une théorie. Dans le cas de Turing, il a commencé en logique. (indécidabilité). Puis, il s'est trouvé face à des problèmes extrêmement concrets, en particulier, la guerre à gagner. Et puis, derrière, il y a eu tout le développement de l'informatique, de l'intelligence artificielle, etc.

Dans le cas de Kantorovitch, il a commencé dans l'analyse fonctionnelle la plus pure. Il s'est retrouvé face à un problème d'optimisation industrielle. Il s'agissait d'optimiser les filières industrielles dans lesquelles différentes qualités de bois étaient mises en œuvre. C'est le contreplaqué qui a changé la vie de Kantorovitch. Il s'est retrouvé à développer toute la théorie du transport optimal et de l'optimisation et, partant, toute la recherche opérationnelle

Ce sont des exemples qui nous incitent à un retour fructueux entre la théorie et les applications.

*BB* : Je vous remercie d'avoir accepté ce débat et d'avoir noté nos points de divergence qui ne sont pas si fondamentaux. Je vous souhaite bonne chance pour la suite.

Ce débat a été enregistré. Je pense qu'il sera disponible sur YouTube avec votre permission, bien sûr.

*CV* : Bien sûr, Bernard, il ne s'est rien dit qu'il puisse choquer qui que ce soit, pas même les dinosaures. Vous savez que, au point de vue phylogénétique, les oiseaux sont tous des dinosaures. Si on raisonne en termes phylogénétiques, je pense qu'aucun oiseau de ma connaissance ne sera choqué parce que nous avons dit !

*BB* : On n'est pas obligé de le leur dire ! Merci infiniment et bonne chance pour la suite !