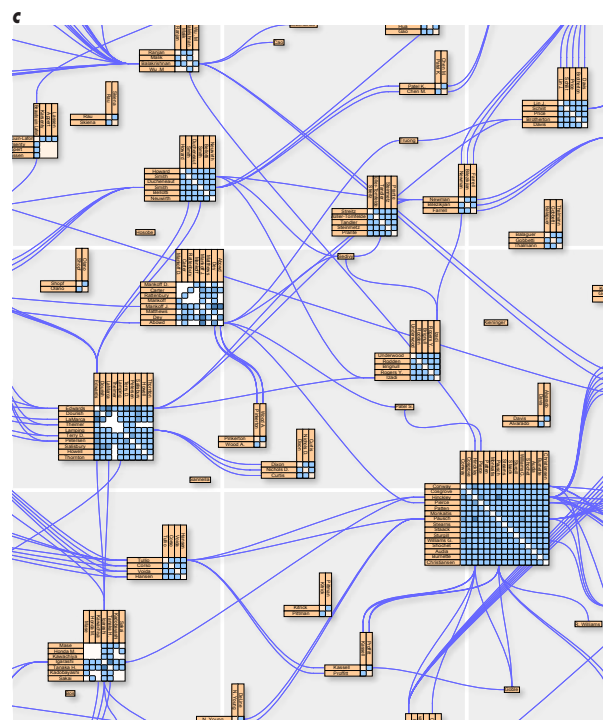
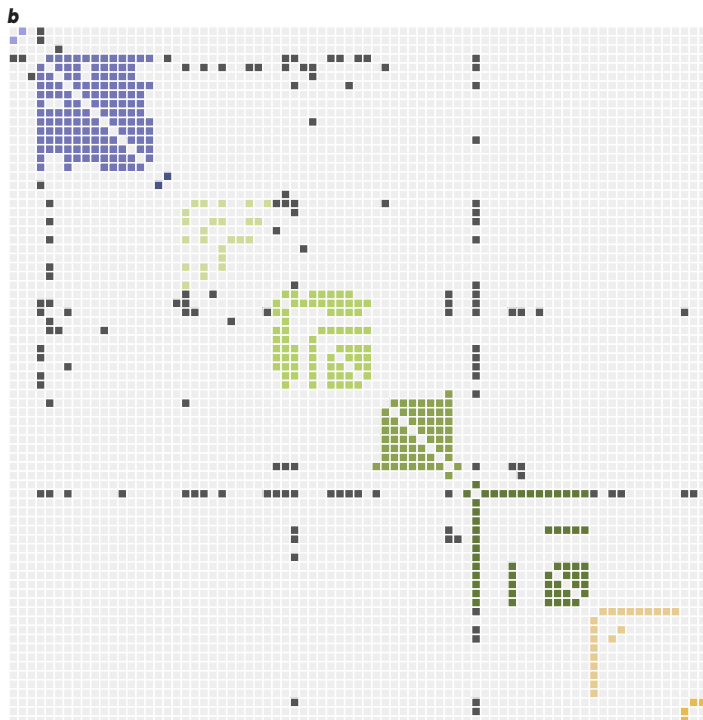
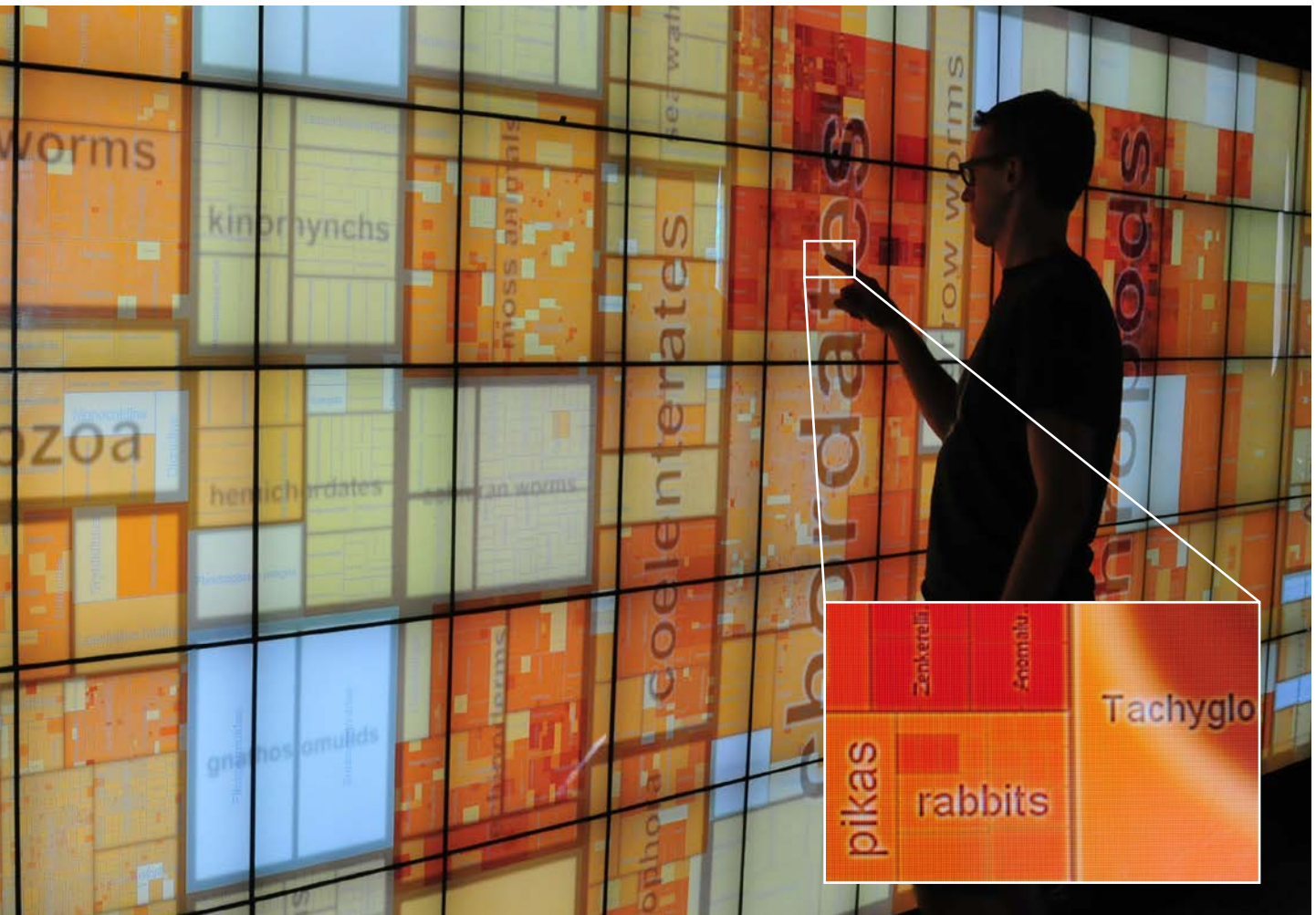


Je vois, donc je comprends



L'ESSENTIEL

● La notion de cause a connu des fortunes diverses au cours des siècles et a cédé la place, en science, au principe de causalité.

● La science a continué de se bâtir sur des théories physiques et des lois universelles.

● Aujourd'hui, l'essor du *big data* s'accompagne d'une possible nouvelle science fondée sur les corrélations. Est-ce la fin de la théorie ?

● Si elle peut remporter quelques succès, cette voie ne conduira jamais à des théories du niveau de la relativité générale.

L'AUTEUR



ÉTIENNE KLEIN
est philosophe des sciences et
directeur de recherche au CEA.

Vers une nouvelle SCIENCE ?

Aux échecs, au jeu de go, le silicium écrase parfois le neurone. Est-ce une raison pour confier à des machines, gavées de données, l'activité scientifique de demain ?



Cet article est extrait en partie du livre *Matière à contredire*, essai de philo-physique, à paraître le 7 février 2018 aux Éditions de l'Observatoire.

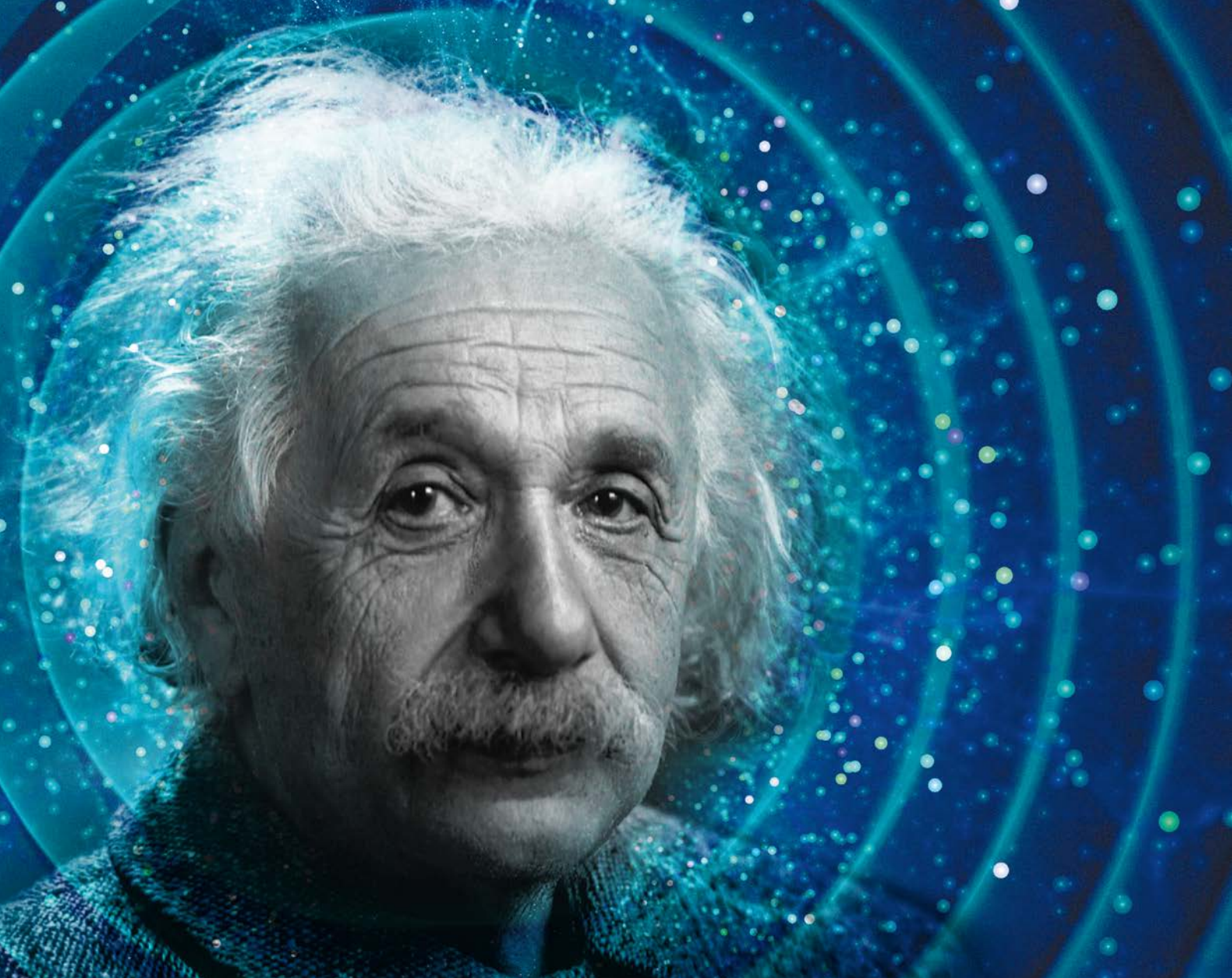
E

n juin 2008, Chris Anderson, rédacteur en chef du magazine *Wired*, publiait un article au titre provocateur : «*The end of theory: The data deluge makes the scientific method obsolete*» («La fin de la théorie : le *big data* rend obsolète la méthode scientifique»). Il y défendait l'idée que lorsque nous disposons de suffisamment de données, les nombres

parleront d'eux-mêmes et les corrélations qu'ils dévoileront remplaceront les relations de causalité que manifestent les lois théoriques. La science changerait alors de visage puisqu'elle pourrait se développer sans plus énoncer d'hypothèses, et sans plus s'appuyer sur des théories explicites. Prophétie ou délire techno-utopiste ?

DE LA MONARCHIE ANGLAISE

Pour trancher, ou au moins disposer d'éléments de réponse, nous devons d'abord revenir sur l'idée de causalité. On dit souvent des sciences dures, notamment de la physique, qu'elles visent à identifier les causes des phénomènes naturels. En réalité, la notion de cause, au sens fort du terme, a posé tant de problèmes aux physiciens qu'ils ont fini par quasiment l'abandonner. Ils ne l'invoquent en tout cas presque plus de façon explicite, même si le concept de cause demeure présent dans certains de leurs discours.



La cause en est (si l'on ose dire) celle identifiée par Bertrand Russell: «Il en va du concept de cause comme de la monarchie anglaise, à savoir qu'on ne l'a laissée survivre que parce qu'on suppose à tort qu'elle ne fait pas de dégâts.» Le mathématicien et philosophe britannique prenait l'exemple de la loi de gravitation afin de montrer comment celle-ci aplatit la notion de causalité. «Dans les mouvements des corps gravitant ensemble, il n'y a rien qui puisse être appelé une cause, et il n'y a rien qui puisse être appelé un effet: il y a là simplement une formule qui permet de calculer la configuration du système à n'importe quel instant.»

Après avoir joué un rôle essentiel dans la physique des ^{xvii}^e et ^{xviii}^e siècles, l'idée de cause a en effet vu son importance décliner en deux étapes. Au ^{xix}^e siècle d'abord, elle s'est effacée au profit de la notion de loi physique, et a pâti de l'assouplissement du déterminisme du fait de l'apparition des probabilités en physique statistique. Ensuite, au ^{xx}^e siècle, la

physique quantique lui a porté le coup de grâce. De fait, l'usage que cette physique fait des probabilités interdit qu'on puisse parler, à propos des processus quantiques, de «cause» au sens strict du terme.

C'est ainsi que, progressivement, l'idée de cause semble avoir été évacuée des théories scientifiques pour se résorber dans la dynamique même des systèmes. Pourtant, le principe de causalité, lui, reste parfaitement vivace! Il stipule que si un phénomène, nommé cause, produit un autre phénomène, nommé effet, alors l'effet ne peut précéder la cause. Désormais épuré de l'idée de cause (on cherche le suffisant et le nécessaire à un événement), le principe de causalité a permis l'élaboration des théories de la physique moderne (physique quantique et théories de la relativité), et il structure en profondeur celles qui sont à l'ébauche: il impose un ordre obligatoire et absolu entre divers phénomènes, sans que l'un puisse être présenté comme la cause de l'autre. ➤

Pourrions-nous retrouver les équations d'Einstein, qui prévoient notamment les ondes gravitationnelles, à partir du seul big data ?

➤ En pratique, le principe de causalité se décline dans les différents formalismes de la physique: il s'adapte à chacun d'eux, y prend une forme qui dépend de la façon dont les événements et les phénomènes sont mathématiquement représentés. Ses conséquences sont toujours extrêmement contraignantes. Elles s'expriment sous la forme d'interdictions ou de prédictions, qui dépendent de façon cruciale de la théorie qu'on considère.

En physique newtonienne, la causalité brise le cercle du temps, celui-ci devenant linéaire et non cyclique. Cette ouverture topologique suffit à assurer qu'un effet ne peut pas rétroagir sur sa propre cause. En relativité restreinte, la causalité interdit qu'une particule puisse se propager plus vite que la lumière dans le vide, car alors elle pourrait voyager dans le passé et éventuellement y changer le cours d'événements qui se sont déjà produits...

En physique des particules, la prise en compte de la causalité a permis de prédire l'existence de l'antimatière, dûment confirmée ensuite par l'expérience.

AU NOM DE LA LOI, AU NOM DE LA CAUSE

Mais dès lors que la physique a renoncé aux causes proprement dites et a dissous l'idée même de causalité dans celle de loi physique, il nous incombe de clarifier cette dernière notion: quel lien peut-il exister entre l'univers physique et les lois universelles qui découlent des théories physiques? En d'autres termes, quel est le statut des lois physiques et comment parviennent-elles à s'appliquer aux objets physiques?

Une première piste consiste à considérer que les lois physiques seraient des produits de l'intellect, ou du moins qu'elles en seraient inséparables. Mais comment la pensée de l'homme, qui n'est qu'une partie micro-infime de l'Univers, parviendrait-elle à saisir la structure du tout qui la contient? Autrement dit, grâce à quelle nature très spéciale les lois physiques pourraient-elles participer à la fois du monde qu'elles structurent et de la pensée qui comprend ce monde? Y aurait-il une parenté de structure, voire une identité, entre l'esprit humain et l'Univers?

On peut préférer considérer, derrière Platon, l'existence de deux mondes distincts; d'une part, celui des formes intelligibles, constitué de réalités immuables et universelles, et faisant l'objet d'une connaissance et d'un discours vrais; d'autre part, celui des choses sensibles, qui ne sont que des copies approximatives des formes pures. En langage moderne, cela reviendrait à dire que les équations mathématiques exprimant les lois physiques sont «transcendantes» et non pas immanentes, c'est-à-dire indépendantes de l'Univers

empirique, et que ce dernier n'en constitue qu'une image mobile et imparfaite.

L'Univers serait en quelque sorte un écho physique dégradé de la pureté mathématique qui le tiendrait sous sa coupe. Mais si tel est le cas, comment le monde des équations parvient-il à structurer «à distance» le monde des phénomènes? Ou, redit en langage platonicien, comment les formes intelligibles participent-elles aux formes sensibles? En guise de réponse à cette question, Platon avait énoncé dans le

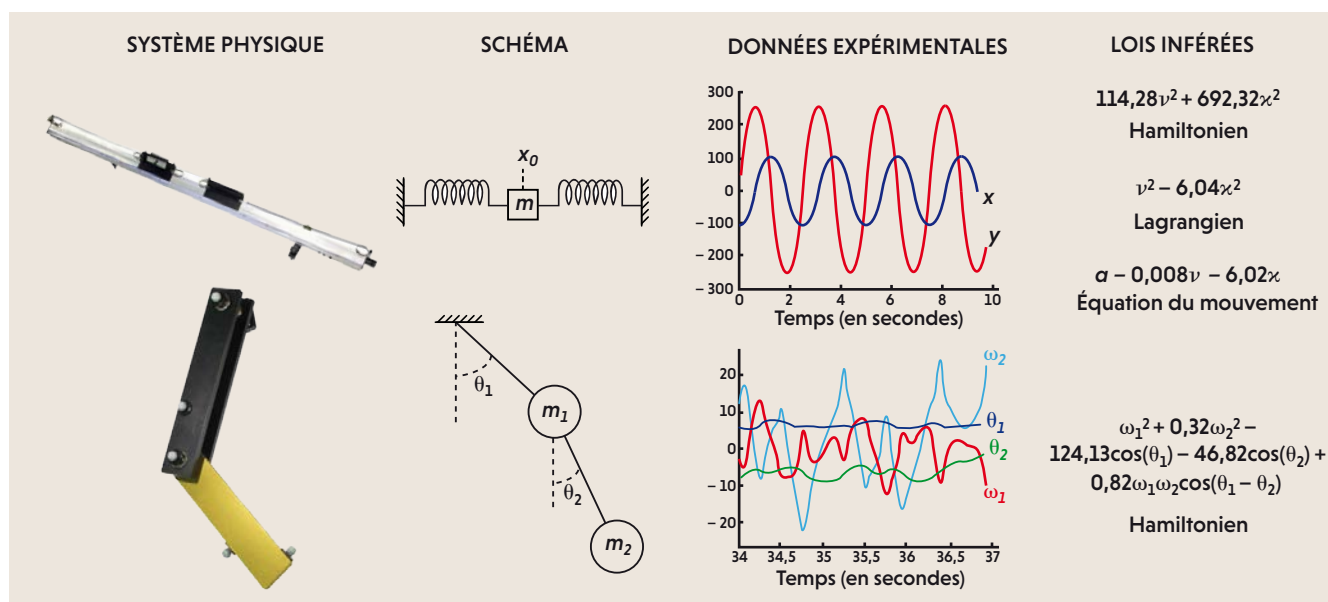
**Un algorithme
« naïf » a réussi
à redécouvrir
plusieurs lois
physiques à partir
de données**

Timée deux hypothèses donnant naissance à deux fictions: celle d'un démiurge, qui met en ordre l'Univers, et celle de la *khora*, le matériau sur lequel intervient le démiurge en s'inspirant du mieux qu'il peut, mais de manière infidèle, des formes intelligibles. Comment ces idées pourraient-elles s'adapter à la physique contemporaine, peu friande en démiurges?

Ces embarras peuvent nous porter à suivre plutôt Spinoza, selon lequel il n'y a qu'un seul et même univers, mais qui se donne sous deux modalités différentes: d'un côté, un univers matériel et spatial, et, de l'autre, un univers législatif contenant des lois, des principes et des règles qui sont accessibles à la pensée. Mais là encore, comment ces deux modalités d'être de l'Univers communiquent-elles? Par quelle médiation les lois de la matière, qui relèvent du deuxième mode, parviennent-elles à s'imposer à la matière, située, elle, dans le premier mode?

On voit par là que les questions les plus vives de la cosmologie contemporaine font lointainement écho aux systèmes philosophiques les plus puissants. Mais parmi toutes ces options, ou d'autres également imaginables, comment choisir?

La réponse s'annonce d'autant plus délicate qu'un bouleversement est en train de se



Un algorithme retrouve les lois de la mécanique (à droite) à partir des données (au centre) collectées sur des dispositifs mécaniques (à gauche). En est-il pour autant un scientifique ?

produire, de plus en plus manifeste: l'arrivée du *big data*. Tout le monde en parle, et pour cause: couplé à l'intelligence artificielle (voir *La révolution de l'apprentissage profond*, par Y. Bengio, page 42), le *big data* a déjà, et aura plus encore dans l'avenir, un impact majeur sur les technologies, le travail, les emplois, l'économie (voir *l'entretien avec D. Cohen*, page 8), la médecine et les relations interpersonnelles. Et aussi, à l'évidence, sur les sciences, notamment sur la façon de mener les recherches, et peut-être aussi sur le statut même des lois physiques. De quelle façon ?

LES PILIERS DE LA SCIENCE

Galilée est à juste titre considéré comme l'inventeur de la science telle que nous la pratiquons depuis quatre siècles, dont les deux grands piliers ont été la théorisation et l'expérimentation: on élabore des hypothèses conduisant à la formulation de lois, qui sont ensuite testées grâce à des expériences spécifiques, souvent très éloignées de la simple observation. Par exemple, lorsque, en 1604, Galilée énonce que tous les corps, quelle que soit leur masse, tombent à la même vitesse, il formule une loi qui n'est ni conforme aux données empiriques de l'époque, ni directement observable (elle ne peut l'être que dans le vide): elle ne sera expérimentalement vérifiée que bien plus tard.

Mais cette façon de faire de la science n'est-elle pas en train de changer sous nos yeux? Avec l'arrivée du *big data*, ce modèle canonique demeurera-t-il toujours vrai? Continuerons-nous d'honorer la pensée spéculative, d'incliner à «la gravité enjouée de l'enquête métaphysique»? L'article de Chris Anderson cité en introduction répondait par la négative à ces questions.

Le *big data* est cet ensemble énorme de données brutes et silencieuses, dont le volume augmente à une vitesse prodigieuse. Ces données choisies mémorisent les «traces» de l'activité d'êtres vivants, de machines, d'objets, et leurs états successifs. Leur collecte est principalement automatique, puis ces données sont analysées par des algorithmes qui y détectent des régularités, par exemple dans le comportement des consommateurs, des machines, des indices économiques, du trafic routier...

À partir de ces régularités, ils infèrent des règles prédictives que nous avons tendance à considérer comme des normes, ou comme des lois générales, voire universelles, alors qu'elles ne sont que la condensation de ce qui a déjà eu lieu: dès lors que le futur qu'elles configurent n'est que du passé extrapolé, elles ne peuvent correctement prédire l'avenir qu'à la condition que celui-ci prolonge le passé, sans surprises ni ruptures ni inventions.

Privilégier de la sorte l'induction, n'est-ce pas faire exagérément confiance à une certaine uniformité du cours de la nature et trop croire que certaines choses n'arriveront pas? L'idée de rupture n'est-elle pas en train de disparaître ?

Certes, le *big data* ouvre des perspectives fascinantes, notamment celle de redécouvrir des lois universelles déjà connues par la simple analyse de données massives. C'est ce qu'ont montré Michael Schmidt et Hod Lipson, de l'université Cornell, à Ithaca, aux États-Unis. Ils ont d'abord accumulé des données de positions, de vitesse, d'angles... enregistrées en certains points d'un dispositif mécanique en mouvement, notamment un double pendule au comportement chaotique (voir la figure ci-dessus). Ensuite, ces informations ont alimenté un algorithme « naïf », c'est-à-dire

➤ dépourvu de toute connaissance en géométrie et en physique. Le programme a réussi à «découvrir» plusieurs lois (les Hamiltoniens, les Lagrangiens, la conservation du moment...). En d'autres termes, l'algorithme s'est mué en un physicien ! Dans ce cas, les lois identifiées étaient connues, mais pourquoi ne pas imaginer qu'un algorithme puisse identifier de nouvelles lois ?

Le *big data* peut également aider à la compréhension d'événements impliquant de très grands nombres de variables quantifiables, tels les phénomènes météorologiques ou climatiques, les comportements électoraux, l'usage des réseaux sociaux...

FUYEZ L'HÔPITAL !

Toutefois, ce transfert vers les *big data* n'est pas sans risque. De fait, il est aussi possible que nous nous égarions dans l'identification de multiples corrélations, pas forcément bien interprétées. Or une corrélation n'est pas une relation de cause à effet. Elle marque simplement le fait que deux grandeurs semblent dépendre l'une de l'autre, au sens où si l'une augmente, l'autre augmente ou décroît «de la même façon».

Par exemple, il a été récemment démontré dans une université américaine que les étudiants qui sont les plus gros consommateurs d'alcool ont tendance à avoir des résultats scolaires moins bons que les autres. L'alcool est-il la cause directe de cette baisse de niveau ? N'allons pas trop vite en besogne. On peut certes imaginer que l'alcool rende stupide, mais d'autres hypothèses sont aussi envisageables : les étudiants qui boivent de l'alcool seraient à la base de moins bons étudiants ; ou bien ils seraient moins attentifs que les autres les lendemains de soirées arrosées, expliquant leurs déboires aux examens ; ou bien encore, ils boiraient plus que de raison afin de calmer leur peur d'échouer ou pour noyer des chagrins n'ayant rien à voir avec leurs études...

Ainsi, une corrélation manifeste n'est pas nécessairement la manifestation d'une relation de causalité : ce n'est pas parce qu'il y a des grenouilles après la pluie qu'on a le droit de dire qu'il a plu des grenouilles. Mais il arrive très souvent que nous confondions les deux notions, à la manière d'un Coluche conseillant de ne jamais aller à l'hôpital au motif qu'on y meurt en moyenne plus souvent que chez soi... Plusieurs sites recensent ce type de corrélations (voir la figure page ci-contre) relevant de l'effet cigogne : le taux de natalité augmentant comme le nombre de nids de cigognes, on en déduit que les cigognes apportent les bébés ! Il y a matière à sourire, mais le problème n'en demeure pas moins sérieux.

Il y a bien la possibilité qu'avec le *big data*, au lieu de théoriser, nous cédions aux facilités

de l'induction et délaissions le «geste théorique» de type galiléen, celui qui consiste à énoncer des hypothèses portant bien au-delà des données disponibles.

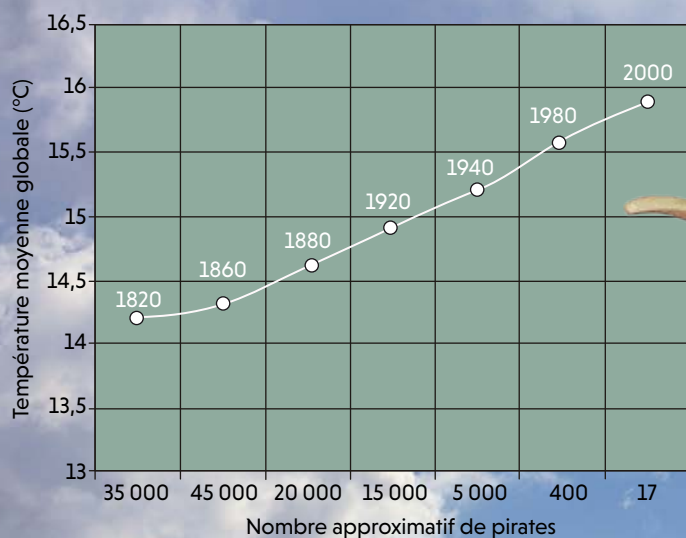
À cet égard, le cas d'Albert Einstein est exemplaire. En 1915, il publiait la théorie de la relativité générale, une conception révolutionnaire de la gravitation, alors qu'il n'avait que très peu de données sur l'Univers à sa disposition : on ignorait, par exemple, pourquoi les étoiles brillent, que d'autres galaxies hormis la

N'allez jamais à l'hôpital, on y meurt en moyenne plus souvent que chez soi

nôtre existent, que l'Univers est en expansion, etc. Cela n'a pas empêché les équations d'Einstein de parfaitement s'accommoder de la quantité gigantesque de données recueillies depuis un siècle par les télescopes et les satellites. En outre, elles constituent les fondations d'une véritable cosmologie scientifique, capable d'envisager l'Univers en tant qu'objet physique, doté de propriétés qui le caractérisent «lui-même».

Elles ont même permis de prédire l'existence des ondes gravitationnelles un siècle avant leur première détection, en septembre 2016. Une théorie peut donc non seulement enrichir l'univers des données, mais également agir comme un «treuil ontologique» capable de faire apparaître de nouveaux éléments de réalité. En d'autres termes, la théorie en «dit plus» que les données, notamment par le fait qu'elle explicite des lois que les données n'illustrent jamais que de façon partielle.

Imaginons maintenant que les choses se soient passées dans l'ordre inverse, c'est-à-dire que nous ayons commencé avec toutes les données dont nous disposons aujourd'hui, mais sans avoir à notre disposition la théorie de la relativité générale. Pourrions-nous, par une sorte d'induction théorique permettant de passer des données aux lois, découvrir les



équations d'Einstein? Rien n'est moins sûr, même si, nous l'avons vu, certaines lois physiques simples ont pu être récemment «redécouvertes» à partir de l'analyse d'un ensemble de données expérimentales.

La réponse d'Einstein à cette question aurait en tout cas été négative, du moins si l'on en croit la lettre qu'il écrivit un jour à son grand ami Maurice Solovine: «Aucune méthode inductive ne peut conduire aux concepts fondamentaux de la physique. L'incapacité à le comprendre est la plus grave erreur philosophique de nombreux penseurs du XIX^e siècle.»

Quelques années plus tard, lors d'une conférence qu'il donna à Oxford avant de quitter définitivement l'Europe pour l'Amérique, il précisa quelle était selon lui la base de l'invention des idées scientifiques: «L'expérience peut bien entendu nous guider dans notre choix des concepts mathématiques à utiliser, mais il n'est pas possible qu'elle soit la source d'où ils découlent. C'est dans les mathématiques que réside le principe vraiment créateur. En un certain sens, donc, je tiens pour vrai que la pensée pure est compétente pour comprendre le réel, ainsi que les Anciens l'avaient rêvé.»

En la matière, les prochaines décennies, toutes gorgées d'intelligence dite «artificielle» et de «*very big data*», viendront-elles contredire la pertinence de cet avis? Il est raisonnable d'en douter, pour au moins deux raisons.

La première tient à ce que l'intelligence artificielle porte bien son nom: elle n'est qu'une intelligence fabriquée au moyen de techniques informatiques, de sorte que rien

Selon le pastafarisme, une parodie de religion parfois considérée comme une version moderne de la thèse de Russell (une métaphore qui illustre le fait que c'est au croyant de prouver les bases «*invérifiables*» de la religion), le déclin de la piraterie est la cause du réchauffement climatique, car la température moyenne sur la Terre est corrélée, de façon inverse, à la population de pirates.

ne permet de penser qu'elle soit elle-même «pensante». Pour doter les machines d'une pensée autonome, analogue à la pensée humaine, il faudrait déjà comprendre en détail les mécanismes de cette dernière, ce qui est loin d'être acquis, et aussi en donner une définition qui soit à la fois opératoire et exhaustive. Classer des milliers de photographies mieux et plus vite que n'importe quel humain est une chose, mais inventer des concepts et les associer en est une tout autre...

APPELONS UN CHAT UN CHAT, MAIS COMMENT ?

La seconde tient en ce que les techniques de l'intelligence artificielle, tel le *deep learning* (voir *La révolution de l'apprentissage profond*, par Y. Bengio, page 42), fonctionnent comme des boîtes noires. Lorsque je vois un chat et reconnais aussitôt qu'il s'agit bien d'un chat, j'effectue une opération qui n'est pas de même nature que celle d'un logiciel d'intelligence artificielle: lui constate que l'objet qui lui est présenté ressemble à d'innombrables autres chats dont on lui a préalablement fourni les images pour «l'entraîner», mais sans que quiconque puisse déterminer comment il effectue ce constat, ni indiquer quelles sont les ressemblances qui font «tilt» pour lui.

Il est donc difficile d'imaginer que l'intelligence artificielle puisse élaborer des théories physiques, et encore moins, si d'aventure elle le pouvait, que celles-ci puissent nous être intelligibles. Jusqu'à preuve du contraire, physicien demeure un métier d'avenir. ■

BIBLIOGRAPHIE

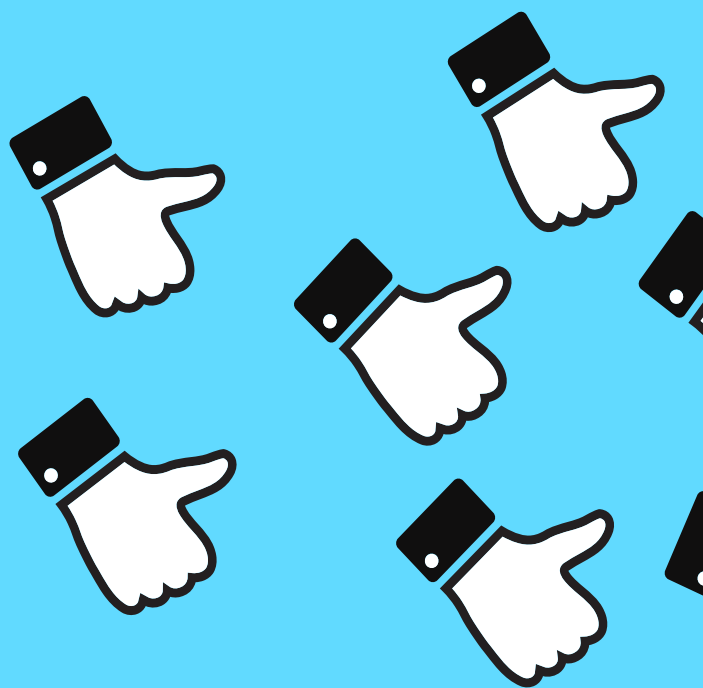
G. BERRY, *L'hyperpuissance de l'informatique : Algorithmes, données, machines, réseaux*, Odile Jacob, 2017

M. SCHMIDT ET H. LIPSON, *Distilling Free-Form Natural Laws from Experimental Data*, *Science*, vol. 324, pp. 81-85, 2009.

FAKE NEWS

L'histoire secrète de leur succès

Les internautes diffusent massivement des informations fausses et des théories conspirationnistes farfelues. Quels mécanismes expliquent cet inquiétant phénomène ? Des études statistiques sur le réseau Facebook répondent.



L'ESSENTIEL

- Sur les réseaux sociaux tels que Facebook, de fausses informations et des théories fumeuses circulent facilement, avec parfois de graves conséquences.
- La masse de données disponibles permet d'étudier ces phénomènes de désinformation de façon quantitative.
- Les analyses montrent que le biais cognitif dit de confirmation joue un rôle majeur: les internautes forment des groupes solidaires qui autoentretiennent leurs opinions et préjugés.
- Il apparaît que les tenants des thèses conspirationnistes sont réfractaires à la démystification.

L'AUTEUR



WALTER QUATTROCIOCCHI coordonne le Laboratoire de sciences sociales computationnelles à l'école IMT des hautes études de Lucques, en Italie.