

BIBLIOGRAPHIE

T. Vigen, **Spurious Correlations**, Hachette Books, 2015.

F. Messerli, **Chocolate consumption, cognitive function, and Nobel laureates**, *The New England Journal of Medicine*, vol. 367(16), pp. 1562-1566, 2012.

S. Young et A. Karr, **Deming, data and observational studies**, *Significance*, vol. 8(3), pp. 116-120, 2011.

H. Zenil et J.-P. Delahaye, **On the algorithmic nature of the world**, dans G. Dodig-Crnkovic & M. Burgin (éds.), *Information and Computation*, World Scientific, 2010 (<https://arxiv.org/abs/0906.3554>).

H. White, **A reality check for data snooping**, *Econometrica*, vol. 68(5), pp. 1097-1126, 2000.

toujours une bonne compréhension, cela nous conduit à voir des choses complexes et inattendues quand il n'y a en fait que des choses simples. Cette théorie algorithmique de l'information, ou théorie de la complexité de Kolmogorov, mesure la complexité d'un objet par la taille du plus petit programme qui l'engendre. Elle s'applique aux objets numériques, ou susceptibles d'être représentés numériquement, tels que les images, les sons, les films, et à la plupart des objets du monde réel, si l'on ne prend en compte que leur apparence.

La théorie suggère que parmi les objets utilisant le même nombre de bits d'information (par exemple des images d'un million de pixels), les plus simples, c'est-à-dire ceux ayant la plus faible complexité de Kolmogorov, sont ceux qu'on rencontrera le plus fréquemment. Cela découle d'un théorème de Leonid Levin d'après lequel plus la complexité de Kolmogorov d'un objet ou d'une structure est élevée, moins il est probable que cet objet ou cette structure soit produite par une machine prise au hasard.

Si l'on pense que le monde physique est une sorte de grand système d'interactions menant une forme de calcul qui produit les objets et structures qu'on y rencontre, il est alors naturel de penser que les objets présents dans le monde y apparaissent avec une probabilité liée à leur mesure de Levin, et donc que les plus simples au sens de la complexité de Kolmogorov sont les plus fréquents. Des détails sur cette idée sont donnés dans un article d'Hector Zenil et moi-même (*voir la bibliographie*). Notons qu'il s'agit d'une idée conforme à l'intuition: dans une image numérique en noir et blanc représentant une photo prise du monde réel, on a plus de chances de rencontrer la série de 10 pixels blancs, *bbbbbbbbbb*, qui a une faible complexité de Kolmogorov, que la série précise *bnbbnbnbbb* dont la complexité de Kolmogorov est supérieure.

Une étoile est sphérique, comme le sont beaucoup de fruits. La section d'un tronc d'arbre est circulaire, comme le sont aussi les roues qui équipent nos véhicules. Une tige de blé est parfaitement rectiligne, comme les arêtes d'un cristal. La surface d'un lac est plane comme l'est, regardée de près, la peau de nombreux animaux. Tout cela correspond à des formes simples au sens de la théorie de Kolmogorov. Dans ces cas-là, nous ne cherchons donc pas à trouver une origine commune à deux objets sphériques, ou rectilignes, ou plans. Les formes simples n'ont pas nécessairement une origine commune, leur simplicité suffit à expliquer qu'on les retrouve partout. Jusqu'ici, tout va bien.

En revanche, certains objets ou formes que la théorie de la complexité de Kolmogorov identifie comme simples ne sont pas perçus comme tels par notre jugement immédiat. Une



Certains coquillages arborent à leur surface des motifs très semblables à la figure fractale dénommée triangle de Sierpiński, obtenue en enlevant d'un triangle un triangle central et en répétant indéfiniment l'opération (à droite). Ces motifs sont perçus comme complexes, alors qu'ils sont algorithmiquement simples.

structure comme celle du triangle de Sierpiński (*voir la figure ci-dessus*) nous apparaît complexe alors qu'elle ne l'est pas, puisque des programmes très courts l'engendrent. Si l'on rencontre souvent cette forme dans la nature, en particulier à la surface des coquillages, c'est parce que cette structure est simple, comme le sont une sphère ou un segment de droite.

Nous ne devons donc pas nous émerveiller de ces rencontres multiples sans lien, ni surtout imaginer qu'elles proviennent d'une sorte de fonctionnement secret de l'Univers qui resterait à comprendre. Comme pour la sphère, leur simplicité est l'explication de leur fréquente apparition.

Ce qui est vrai pour le tapis de Sierpiński l'est aussi pour la suite de Fibonacci, dont certains s'émerveillent à tort qu'on la rencontre si souvent. C'est encore vrai pour le nombre d'or, qui suscite une superstition numérolgique. Cela l'est encore d'une multitude de formes fractales qui sont simples et dont on ne doit donc pas s'étonner de les rencontrer. Il est normal que les objets de faible complexité de Kolmogorov se retrouvent partout. Rechercher une explication profonde à la présence multiple de la suite de Fibonacci dans toutes sortes d'objets naturels ou artificiels est aussi naïf que rechercher une explication commune à la présence de longs segments rectilignes dans les arbres, dans les tracés dessinés par les couches géologiques, les stalagmites ou dans le ciel quand une météorite pénètre l'atmosphère terrestre.

Nous percevons facilement la simplicité de certaines formes, mais pour d'autres, il nous faut réfléchir à la théorie qui permet de comprendre la simplicité. Si nous réussissons, nous serons moins enclins à vouloir expliquer ce que nous percevons comme des coïncidences. Ici, comme pour les doubles tirages identiques au Loto, ou les courbes parallèles montrant des corrélations illusoire, nous devons éviter de rechercher des causes communes à ce qui, logiquement, n'en a pas besoin. ■

LES AUTEURS



JEAN-MICHEL COURTY
professeur de physique
à l'université
Pierre-et-Marie-Curie,
à Paris



ÉDOUARD KIERLIK
également professeur
de physique à l'université
Pierre-et-Marie-Curie

VOIR LA NUIT COMME EN PLEIN JOUR

Bien voir quand il y a très peu de lumière est possible... à condition de s'équiper d'appareils de vision nocturne, des systèmes amplificateurs qui transforment chaque photon en une cascade d'électrons.

Lorsque la nuit tombe et que nous peinons à distinguer quoi que ce soit, les lynx, chouettes et autres animaux nocturnes voient, eux, parfaitement leur environnement.

Leurs yeux sont capables de tirer profit du peu de lumière qui reste. Mais nous autres humains sommes capables de les imiter, grâce à des lunettes, jumelles ou caméras ultrasensibles qui exploitent, à l'aide de systèmes électroniques, le moindre photon disponible.

UN ŒIL TRÈS SENSIBLE

Afin de comprendre comment fonctionnent ces appareils, faisons d'abord un détour par le mécanisme de la vision humaine (ou animale). En pleine nuit, lorsque notre œil est parfaitement habitué à l'obscurité et que nous observons le ciel par une nuit sans lune, il suffit qu'un seul photon atteigne notre rétine pour produire un signal nerveux interprétable par notre cerveau. Cette sensibilité nous permet de deviner la présence d'étoiles très peu brillantes dans le ciel et, plus généralement, la présence d'une source lumineuse très faible. Mais elle est

insuffisante pour distinguer des objets plongés dans la pénombre, par exemple.

Ce contraste entre une haute sensibilité à la lumière et l'incapacité de distinguer les formes dans l'obscurité profonde tient à la physiologie des yeux humains, plutôt adaptés à la vision de jour et en couleur.

La partie centrale de notre rétine est couverte de cônes, des photorécepteurs dont la déclinaison en trois types est à l'origine de notre vision trichromatique des couleurs. Tout le reste est tapissé de bâtonnets, d'un seul type, qui conduisent à une vision monochrome. Comme la surface de collecte des bâtonnets est bien plus grande que celle des cônes, ce sont eux qui assurent notre vision en situation de faible intensité lumineuse.

Le fonctionnement de ces bâtonnets est instructif. Quand un photon incident est absorbé par la rhodopsine, un pigment photosensible présent dans la cellule bâtonnet, il entraîne dans 70 % des cas le changement de conformation d'une molécule, lequel déclenche des réactions en chaîne qui vont conduire à la fermeture d'un grand nombre de canaux ioniques de la paroi cellulaire. Chaque



étape de ce processus en cascade implique la formation de molécules qui catalysent chacune plusieurs dizaines de réactions de l'étape suivante.

L'arrivée d'un seul photon bloque ainsi le passage, à travers la paroi de la cellule réceptrice, de près de 100 millions d'ions en une fraction de seconde. C'est assez pour donner naissance à un signal nerveux d'une intensité électrique d'environ un demi-picoampère (soit $0,5 \times 10^{-12}$ ampère).

CONVERTIR LES PHOTONS PAR EFFET PHOTOÉLECTRIQUE

En s'inspirant de ces mécanismes, ne serait-il pas possible de réaliser un dispositif qui traduise l'arrivée d'un photon en