

en 1885 par Ludwig Scheeffer, qui était un élève de Georg Cantor.

La définition la plus simple de h consiste à la considérer comme une limite de fonctions $h_1, h_2, h_3, \dots$. La fonction continue h_1 vaut 0 en 0, $1/2$ sur le tiers médian de l'intervalle $[0, 1]$, et 1 en 1, et l'on rejoint ces éléments du graphe par des segments de droite (voir l'encadré 3). La fonction h_2 vaut 0, $1/4, 1/2, 3/4, 1$ pour, respectivement, 0, les intervalles $[1/9, 2/9], [1/3, 2/3], [7/9, 8/9]$, et 1. Et ainsi de suite.

La fonction h est étrange. Elle est continue et presque partout constante (de dérivée nulle), c'est-à-dire partout sauf sur un ensemble négligeable. Et pourtant, elle réussit à monter de 0 à 1: elle ne change de valeur «qu'en douce» sur un ensemble de mesure nulle tout en restant continue!

Bien sûr, toutes sortes de variantes existent de cette fonction, qui par exemple sont continues et dérivables, presque partout de dérivée nulle et qui pourtant montent et descendent, voire passent par tous les points qu'on veut s'ils sont en nombre fini.

Notons que notre intuition que «si une fonction a une dérivée nulle presque partout, alors elle est constante» n'est pas entièrement fausse. On démontre en effet que si une fonction a une dérivée nulle sur un intervalle de $\mathbb{R}$, sauf pour les points d'un ensemble dénombrable, alors elle est constante. Dans le cas de la fonction h de Cantor, la dérivée est nulle sauf sur les points de l'ensemble de Cantor, lequel est certes de mesure nulle, mais est infini non dénombrable.

La fonction h permet d'éviter des erreurs, comme celle du Germano-Balte Axel Harnack qui, en 1882, avait cru démontrer que si une fonction a une dérivée nulle sur un intervalle à l'exception des points d'un ensemble de mesure nulle, alors elle est constante.

FONCTIONS CONTINUES PARTOUT MAIS DÉRIVABLES NULLE PART

Venons-en à la catégorie de monstres qui a le plus étonné les mathématiciens, les fonctions continues partout et dérivables nulle part.

Pour une fonction f , être dérivable en un point x signifie que quand y s'approche de x , le rapport $[f(x) - f(y)]/(x - y)$ tend vers une limite finie, la «dérivée en x ». Le concept est naturel: la dérivée (par rapport au temps) de la distance parcourue par un véhicule à l'instant t est sa vitesse à cet instant. Géométriquement, l'existence d'une dérivée en x de la fonction f signifie que le graphe de f a une tangente en x . S'il y a une cassure du graphe, comme c'est le cas en 0 pour la fonction valeur absolue $|x|$, alors la fonction n'est pas dérivable en ce point. L'idée que la continuité d'une fonction sur un intervalle oblige à être assez régulière est naturelle, et l'on pouvait donc croire que si une fonction est continue sur un intervalle, à l'exception de quelques points

(comme pour la fonction $|x|$), la fonction devrait y être dérivable.

Le 18 juillet 1872, le mathématicien allemand Karl Weierstrass présenta à l'Académie des sciences de Berlin un exemple de fonction continue sur $\mathbb{R}$ tout entier et qui n'est pourtant dérivable en aucun point. La fonction proposée résultait de manipulations habituelles sur les fonctions continues dérivables partout: il s'agit d'une somme infinie de telles fonctions. La formule de Weierstrass est:

$$f_{a,b}(x) = \sum_{n=0}^{\infty} a^n \cos(b^n \pi x)$$

Si l'on prend pour coefficients un nombre réel a tel que $0 < a < 1$ et un entier b tel que $ab > 1 + 3\pi/2$, on montre que $f_{a,b}$ est continue sur $\mathbb{R}$ mais n'est dérivable nulle part. Si l'on ne fait la somme que jusqu'à un entier k , on obtient une fonction continue et dérivable qui oscille de plus en plus vite quand k augmente; cette oscillation, qui correspond à une vibration accélérée de la tangente au graphe, rend impossible l'existence de la tangente quand k tend vers l'infini.

Weierstrass ne fut pas le premier à trouver une telle fonction. Au moins deux mathématiciens l'avaient précédé. Le premier est le mathématicien tchèque Bernard Bolzano, qui trouva une telle fonction vers 1830 mais dont les textes sur le sujet ne furent redécouverts que bien plus tard et publiés en 1922. Indépendamment, vers 1860, le mathématicien suisse Charles Cellérier trouva lui aussi une telle fonction, publiée après sa mort en 1890 (pour des détails, voir la belle et très complète thèse de Johan Thim, disponible sur internet).

L'encadré 4 donne le dessin et l'idée d'une autre fonction ayant les propriétés voulues, mais plus facile à visualiser. Son graphe est nommé «courbe du blanc-manger» (car elle ressemble au dessert de même nom) ou «courbe de Takagi», d'après le mathématicien japonais Teiji Takagi qui l'a décrite en 1901.

La courbe de Weierstrass a été l'une des toutes premières courbes fractales étudiées. Pourtant, le calcul de la dimension de Hausdorff du graphe de la fonction de Weierstrass (qui mesure en quelque sorte son agitation) est resté très longtemps un problème ouvert. Conjecturé depuis plus de trente ans par Benoît Mandelbrot, le théorème qui indique que cette dimension est égale à $2 + \ln(a)/\ln(b)$ n'a été prouvé qu'en 2017 par le mathématicien allemand Gerhard Keller, et indépendamment par le mathématicien chinois Weixiao Shen.

Insistons sur le fait que ces courbes étranges font aujourd'hui encore l'objet de nombreuses recherches. On en découvre de nouvelles de la même catégorie et on les rencontre en physique, ce qui prouve que ces «monstres mathématiques» sont à la fois d'une grande banalité et très utiles... ■

BIBLIOGRAPHIE

R. Ferreol, **L'escalier du diable**, <https://bit.ly/2QJLCNg>, consulté en juin 2020.

W. Shen, **Hausdorff dimension of the graphs of the classical Weierstrass functions**, *Mathematische Zeitschrift*, vol. 289, pp. 223-266, 2018.

S. Nechaev et K. Polovnikov, **Rare-event statistics and modular invariance**, *Physics-Uspekhi*, vol. 61(1), pp. 99-104, 2018.

S. Nechaev, **Non euclidean geometry in nature**, dans *Order, Disorder and Criticality, Advanced Problems of Phase Transition Theory*, vol. 5 (ed. Yuri Holovatch), 2018 (<https://arxiv.org/pdf/1705.08013.pdf>).

K. Beanland et al., **Modifications of Thomae's function and differentiability**, *The American Mathematical Monthly*, vol. 116(6), pp. 531-535, 2009.

J. Thim, **Continuous, Nowhere Differentiable Functions**, Master Thesis, Lulea University, 2003 (<https://bit.ly/2YWLYEW>).

L'AUTEUR



LOÏC MANGIN
rédacteur en chef adjoint
à *Pour la Science*

VOIR LA CONFIANCE EN PEINTURE

L'analyse informatique de milliers de portraits peints en Europe montre que la confiance sociale ne cesse d'augmenter depuis le ^{xv}e siècle.

Il a l'air un peu tendu, voire méfiant, et à tout le moins préoccupé. C'est que Thomas Cranmer (1489-1556), représenté par Gerlach Flicke en 1545 (voir le tableau ci-contre), avait fort à faire. Archevêque de Canterbury, il eut à poser avec Thomas Cromwell les fondations de l'Église d'Angleterre sous le règne du tyrannique Henri VIII, désireux de voir annuler son mariage avec Catherine d'Aragon. Le monarque est célèbre notamment pour avoir fait exécuter deux de ses six épouses. Ses successeurs n'étaient pas en reste : Cranmer sera brûlé sur ordre de la catholique Marie I^{re}, dite Marie la sanglante (*Bloody Mary*).

Près de trois siècles plus tard, sir Matthew Wood (1768-1843) sur le tableau d'Arthur William Devis peint vers 1815 (voir le tableau page ci-contre) semble plus assuré, plus affirmé, plus confiant envers

son entourage, et il a de quoi afficher cette expression. Ce fils de tisserand fut tour à tour lord-maire de Londres, élu au parlement et enfin anobli.

Ces portraits qui prenaient des mois à être réalisés portent un message et relèvent d'une stratégie de communication du commanditaire. En un mot, ils sont le reflet d'une époque. Mais ces deux exemples sont-ils représentatifs d'une évolution à plus grande échelle d'un gain de confiance traversant l'histoire ? C'est ce que semblent prouver les résultats de Nicolas Baumard, de l'institut Jean-Nicod (ENS, EHESS, PSL) et de ses collègues de l'Inserm, de Sciences Po et du Cevipof. À travers l'étude d'environ 2 000 portraits d'Européens datés de 1505 à 2016 et conservés à la National Portrait Gallery, à Londres, ils ont montré qu'au fil des siècles, les expressions de confiance et de sympathie se faisaient plus nombreuses sur les visages représentés, alors que les



Les visages de Thomas Cranmer (ci-dessus) et de sir Matthew Wood (à droite) montrent, lorsqu'ils sont analysés par un algorithme (dans les cartouches, les points colorés indiquent ceux pris en compte par le programme) aux côtés de près de 2 000 autres portraits, que la confiance sociale n'a cessé d'augmenter depuis la fin du Moyen Âge.

signes d'une certaine méfiance disparaissaient. La transition de Thomas Cranmer vers Sir Matthew Wood serait bien une tendance générale.

Comment s'y sont pris les scientifiques ? Ils ont conçu un algorithme d'analyses d'images qui a appris à lire l'expression de visages selon par exemple le sourire ou la forme des sourcils. Ce programme d'apprentissage automatique a été « formé » à partir de quatre corpus d'images, des photographies, pour lesquelles le sentiment de confiance exprimé avait déjà été estimé par d'autres techniques. Lors de cette phase d'apprentissage, les biais relatifs à l'âge, au sexe, à



l'orientation du visage ont été pris en compte de façon à ce que l'algorithme reproduise au mieux le jugement humain.

L'analyse par le même algorithme de 4106 portraits de la Web Gallery of Art, couvrant 19 pays d'Europe occidentale entre 1360 et 1918, a conduit à des conclusions similaires. Comment expliquer l'essor des indices faciaux liés à la confiance sociale dans la peinture européenne? Selon les auteurs, on doit y voir le témoignage d'une société de plus en plus apaisée, plus démocratique et de moins en moins marquée par la violence. Cette hypothèse a été testée sur la base de l'analyse de plus de 2000 selfies

publiés sur Instagram dans 6 villes (Bangkok, Berlin, Londres, Moscou, New York et São Paulo): l'algorithme a bien repéré sur les autoportraits les signes d'une confiance interpersonnelle et d'une coopération plus fortes dans les cités où des enquêtes, comme celle du projet international du World Values Survey, avaient déjà montré que ces sentiments étaient plus prononcés.

Cependant, le critère dont l'évolution corroborerait le mieux la tendance mise au jour serait l'accroissement du PIB par habitant. Les auteurs appellent à confirmer l'ensemble de ces résultats à partir d'autres sources. Eux-mêmes s'y emploient d'ores

et déjà en partant de textes littéraires et d'œuvres musicales. On saura alors si l'argent fait le bonheur, du moins celui qui transparaît sur les portraits. ■

L. Safra et al., Tracking historical changes in trustworthiness using machine learning analyses of facial cues in painting, *Nature Communications*, vol. 11, article 4728, 2020.



L'auteur a publié:
Pollock, Turner, Van Gogh, Vermeer et la science...
(Belin, 2018)

LES AUTEURS



JEAN-MICHEL COURTY et ÉDOUARD KIERLIK
professeurs de physique à Sorbonne Université, à Paris

DE L'ÉNERGIE NUCLÉAIRE À PETITE ÉCHELLE

**Sondes spatiales, sous-marins, porte-avions...:
l'exploitation de l'énergie nucléaire ne nécessite pas
forcément des installations industrielles de grande taille.**

Un panache de vapeur d'eau au-dessus de gigantesques tours de refroidissement de centrales plantées au cœur de grands sites industriels, telle est l'image qui nous vient en général lorsqu'on évoque l'énergie nucléaire. Pourtant, une telle énergie est produite à travers des dispositifs de tailles variées et fournit déjà bien plus que l'électricité du réseau. Elle alimente en effet des sondes spatiales, des sous-marins, des porte-avions... Et depuis quelques années, des ingénieurs réfléchissent au développement de petites centrales nucléaires modulaires de moyenne puissance. C'est l'occasion de découvrir quelques-uns des mécanismes physiques à l'œuvre dans ces systèmes.

La célèbre relation d'Einstein $E=mc^2$ montre que l'on peut convertir de

la masse en énergie, et réciproquement. Cette relation est valable en toutes circonstances. Dans les réactions chimiques, les énergies en jeu étant de l'ordre de 100 kilojoules par mole de matière, la variation de masse est de l'ordre du nanogramme, ce qui est négligeable.

DES DÉSINTÉGRATIONS QUI CHAUFFENT

Tel n'est pas le cas des réactions nucléaires, où l'énergie libérée par les désintégrations des noyaux atomiques atteint des dizaines de milliers de gigajoules (l'équivalent de quelques dixièmes de gramme) par mole. Cette énergie se retrouve *in fine* sous forme de chaleur, qu'un dispositif adéquat peut convertir en énergie utile.

Parmi les dispositifs les plus simples, on trouve les générateurs thermiques à

Le rover *Curiosity*, de la Nasa, explore le sol de Mars grâce à de l'énergie nucléaire. Il porte à l'arrière (flèche) un générateur thermique à radio-isotopes (GTR), dispositif qui mesure une soixantaine de centimètres.

radio-isotopes, en abrégé GTR, où des thermopiles assurent la conversion en électricité. C'est ce type de générateur qui alimente en énergie les sondes spatiales comme *Cassini* ou *New Horizons* voyageant aux confins du Système solaire: des panneaux photovoltaïques seraient inefficaces, en raison de la diminution du flux solaire à mesure que l'on s'éloigne de l'astre du jour.

Les GTR équipent aussi les rovers martiens tels que *Curiosity* ou *Perseverance*, embarqué sur la mission *Mars 2020*, et y prennent une place non négligeable: ils se présentent sous la forme d'un cylindre de 64 centimètres

