

Au milieu du XVII^e siècle, l'astronome italien Giovanni Battista Riccioli publie *Almagestum Novum*, une évaluation encyclopédique des systèmes cosmographiques. Il pèse les arguments pour et contre le système copernicien, qu'ils aient trait à l'astronomie, à la physique ou à la religion. Néanmoins, il juge que deux arguments font pencher la balance en défaveur de Copernic. Tous deux reposent sur des objections scientifiques liées aux idées de Brahe. Aucun ne sera tranché avant plusieurs centaines d'années.

La déviation des corps en chute libre

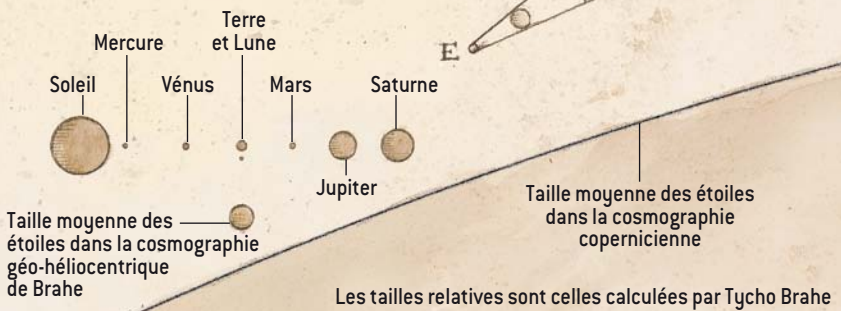
Le premier argument est fondé sur l'incapacité à détecter les effets qu'une planète tournant sur elle-même devrait, explique Riccioli, exercer sur les projectiles et les corps en chute libre. Reprenant une idée d'Aristote, Brahe pensait qu'une Terre en rotation devrait dévier la trajectoire d'un tir rectiligne de projectile. Mais il faudra attendre le XIX^e siècle pour observer une déviation des projectiles et des corps en chute libre et pour que le mathématicien français Gustave Coriolis donne une description mathématique complète de cet effet de la rotation de la Terre.

L'autre argument est celui de Brahe concernant la taille des étoiles, que Riccioli actualise avec des observations à la lunette. Ayant mis au point une procédure reproductible pour mesurer le diamètre des étoiles, il trouve que les étoiles semblent plus petites que ne le pensait Brahe. Mais la lunette augmente aussi la sensibilité à la parallaxe annuelle sans pour autant la détecter, ce qui implique que les étoiles doivent être encore plus lointaines que ne l'avait supposé Brahe. Finalement, les étoiles paraissent toujours aussi titanesques que dans la représentation de Brahe.

Riccioli se plaint que les coperniciens en appellent à l'omnipotence divine pour contourner ce problème scientifique. Prêtre jésuite, Riccioli ne nie pas la puissance de Dieu, mais il rejette cette approche, déclarant que « même si cette idée fausse ne peut être réfutée, elle ne peut satisfaire l'homme prudent ».

Le problème de la taille des étoiles

L'argument le plus cinglant contre l'Univers copernicien fut celui de la taille des étoiles. Quand nous regardons une étoile dans le ciel, elle semble avoir une certaine largeur, petite et fixe. Cette largeur et la distance de l'étoile connues, des calculs géométriques simples révèlent la taille de l'étoile (à droite). Dans les modèles géocentriques de l'Univers, les étoiles sont situées juste au-delà des planètes, ce qui implique que la taille des étoiles est comparable à celle du Soleil (ci-dessous). Mais dans la théorie héliocentrique de Copernic, les étoiles sont extrêmement éloignées. Le même calcul géométrique implique alors qu'elles aient une taille absurde, des centaines de fois supérieure à celle du Soleil (en bas). Les coperniciens ne pouvaient pas expliquer ces données anormales autrement qu'en faisant appel à l'intervention divine. En réalité, les étoiles sont lointaines, mais leur largeur apparente est une illusion, un artefact du comportement de la lumière quand elle pénètre dans la pupille de l'œil ou dans une lunette, comportement que les scientifiques ne comprendront que 200 ans plus tard.



■ BIBLIOGRAPHIE

C. M. Graney, *Stars as the armies of God : Lansbergen's incorporation of Tycho Brahe's star-size argument into the Copernican theory*, *Journal of the History of Astronomy*, vol. 44, pp. 165-172, 2013.

C. M. Graney, *The telescope against Copernicus : Star observations by Riccioli supporting a geocentric universe*, *Journal of History of Astronomy*, vol. 41, pp. 453-467, 2010.

A.-M. Lombardi, *Kepler*, Belin-Pour la Science, 2003.

E. Bellone, *Galilée*, Belin-Pour la Science, 2003.

Si le système copernicien a tardé à être accepté, c'est donc à cause du manque de preuves scientifiques solides confirmant les ordres de grandeur stellaires et cosmiques qu'il implique. Personne n'enregistra de façon convaincante la parallaxe stellaire annuelle avant Friedrich Bessel en 1838. À peu près à ce moment, George Airy donna la première explication théorique de la taille apparente des étoiles et Ferdinand Reich détecta pour la première fois la déviation des corps qui tombent due à la rotation de la Terre, en attendant la spectaculaire expérience du pendule de Foucault en 1851. La physique d'Isaac Newton avait alors depuis longtemps expliqué comment la Terre se meut.

Mais aux époques de Galilée et de Riccioli, ceux qui s'opposaient à Copernic avaient pour eux des arguments scientifiques respectables, cohérents et fondés sur l'observation. Si la science leur a donné tort, ils n'étaient pas de mauvais scientifiques pour autant. La réfutation rigoureuse des arguments solides des autres était et reste une partie du défi et du plaisir de faire de la science. ■

LOGIQUE & CALCUL

Figurations de nombres

L'intuition aide le mathématicien, qui devine les théorèmes avant de les démontrer. Mais il y a plus simple et tout aussi efficace : l'œil détecte des régularités dans les images construites à partir des nombres.

Jean-Paul DELAHAYE

L'œil repère des régularités là où l'analyse brutale des données ne voit souvent rien. Cela explique le succès des méthodes de visualisation et de représentation imagée de l'information numérique. Appliquée aux nombres des mathématiciens, π , $\sqrt{2}$, e , etc., cette idée a depuis longtemps produit d'intéressants résultats, dont de belles formes fractales inattendues. Nous sommes loin d'avoir exploité toutes les possibilités de cette méthode, et les nouveaux procédés proposés pour engendrer des images à partir des nombres sont une source féconde de problèmes de difficultés variées.

Des ensembles de nombres en images

La toute première forme fractale qu'est l'« ensemble triadique de Cantor » (nommé aussi « poussière de Cantor », que l'on notera C) est un ensemble de nombres définissable en quelques mots. Introduit par Georg Cantor en 1884, il s'agit de l'ensemble des nombres réels compris entre 0 et 1, dont il existe un développement en base 3 n'utilisant pas le chiffre '1' (voir l'encadré 1).

Expliquons cette définition. Le développement triadique du nombre 0 est 0,000... ; le nombre réel 0 est donc dans C . Le développement triadique du nombre réel 1 est 1,000... ou 0,222... (car $1 = 2/3 + 2/3^2 + 2/3^3 + \dots$). Cette seconde forme n'utilise pas le chiffre '1', et donc le nombre réel 1 est

dans C . Le développement triadique de $1/2$ s'écrit 0,11111... (car $1/2 = 1/3 + 1/3^2 + 1/3^3 + \dots$) et il n'y en a pas d'autres. Il comporte des 1, et n'a même que cela, le nombre réel $1/2$ n'est donc pas dans C ; etc.

Cette poussière de Cantor est un ensemble non dénombrable (il a autant d'éléments qu'il y a de nombres réels) et pourtant il est de mesure nulle, c'est-à-dire sans « épaisseur ». C'est une fractale : en le grossissant d'un facteur 3 et en n'en conservant que la moitié droite ou gauche, on retrouve l'ensemble de départ. Sa dimension fractale est $\log(2)/\log(3) = 0,630929\dots$, intermédiaire entre celle d'un point, de dimension 0, et celle d'un segment, de dimension 1.

Deux autres fractales parmi les toutes premières sont aussi définies à partir des développements triadiques : le tapis de Sierpinski, dont la dimension fractale est $\log(8)/\log(3) = 1,892789\dots$, et l'éponge de Menger, de dimension $\log(20)/\log(3) = 2,726933\dots$ (voir l'encadré 1).

Le tapis de Sierpinski est l'ensemble des points de coordonnées (x, y) avec x et y compris entre 0 et 1 et tels que x et y n'ont jamais un '1' simultanément en même position dans leur développement en base 3. Le carré central est enlevé, car c'est l'ensemble des points (x, y) dont les développements en base 3 commencent par 0,1. Les centres des huit autres carrés (qu'on supprime de façon itérée dans la construction) sont les points dont les

coordonnées ont toutes deux un développement triadique où figure un '1' en seconde position], etc. L'éponge de Menger est aussi définie par une propriété simple des développements triadiques des coordonnées.

L'œil comprend instantanément la régularité de ces ensembles de nombres dont la définition est peu parlante et un tantinet technique. Cette vision satisfait aussi le mathématicien, qui affine sa perception intuitive des objets. Il en est souvent ainsi : l'œil perçoit immédiatement des propriétés qui, sans l'image, auraient été ignorées. Dans d'autres cas, ce qu'on voit reste incompréhensible ou mal expliqué.

Des nombres premiers sur des spirales

La spirale découverte en 1963 par le mathématicien Stanislaw Ulam illustre l'une de ces étrangetés mal expliquées et qui, pourtant, saute aux yeux. En disposant les entiers en spirale et en noircissant les nombres premiers, on voit des alignements très nets dont aucune explication générale et claire n'a pour l'instant été proposée. Découverte en 1993, et indépendamment par Jean-François Colonna en 1999, la spirale logarithmique des nombres premiers, ou spirale de Sacks, fait aussi apparaître des alignements que l'on ne comprend pas bien (voir l'encadré 2).

Un autre mystère visuel profond lié aux nombres premiers est la « comète de

1. Les ensembles de Cantor, Sierpinski et Menger

La poussière de Cantor (a), le tapis de Sierpinski (b) et l'éponge de Menger (c), parmi les toutes premières fractales découvertes, ont une définition simple quand on les considère comme des ensembles de nombres, de couples de nombres, ou de triplets de nombres.

La poussière de Cantor, ou ensemble triadique de Cantor, est l'ensemble des nombres réels compris entre 0 et 1 dont l'écriture en base 3 ne contient pas de '1'. Une autre dé-

finition est fondée sur un procédé infini de construction : on prend le segment $[0, 1]$, on en enlève le tiers médian, ce qui donne deux segments $[0, 1/3]$ et $[2/3, 1]$ dont on enlève à chacun le tiers médian, et ainsi de suite. L'ensemble limite, les poussières sur le segment $[0, 1]$, est infiniment fin.

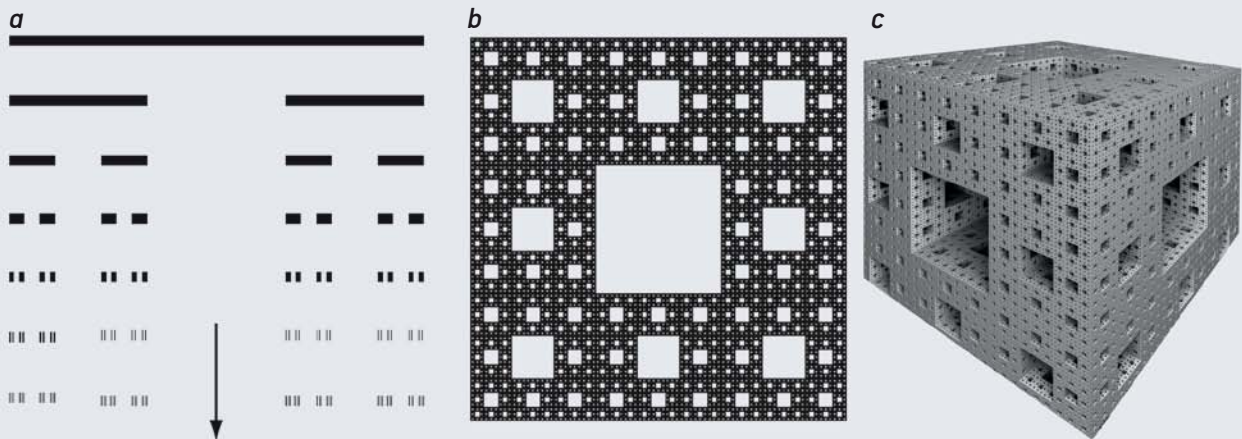
Le tapis de Sierpinski peut aussi être défini par une construction infinie, mais il est plus facile de le définir comme étant l'ensemble de points

du carré $[0, 1] \times [0, 1]$ dont les coordonnées x, y écrites en base 3 n'ont pas un '1' simultanément en même position (pas de '1' pour x et y en première position après le 0, pas de '1' pour x et y en seconde position, etc.).

L'éponge de Menger se définit soit par un procédé de construction infinie (on retire des cubes, de plus en plus petits), soit en disant que c'est l'ensemble des triplets (x, y, z) de nombres réels compris entre 0 et 1, tels que parmi x, y et z , il n'y a ja-

mais deux nombres ayant un '1' en même position de leur développement triadique.

Dans chacun de ces trois exemples, la représentation imagée des ensembles fait saisir concrètement une définition abstraite en termes de développement triadique. Elle permet instantanément de savoir beaucoup de choses sur les ensembles de nombres considérés, par exemple que le tapis et l'éponge sont d'un seul tenant, mais pas la poussière.



Goldbach » : pour chaque nombre pair p , on calcule le nombre k de façons d'écrire p sous la forme d'une somme de deux nombres premiers, et on place le point de coordonnées (n, k) sur un graphe ; cela produit un nuage d'une surprenante régularité (voir l'encadré 3).

Cette forme suggère la présence d'un ordre secret dans le désordre des nombres premiers. Elle apparaît structurée comme une fractale. D'ailleurs, plus on la dessine avec précision, plus nombreuses sont les courbes que l'œil y décèle. Son aspect lisse contraste avec l'irrégularité et l'aléa observés dans la suite 2, 3, 5, 7, 11, 13, On ignore pourquoi ces striures sont si bien organisées selon des règles constantes à tous les ordres de grandeur.

Cependant, la forme de la comète est utile, car elle fournit un argument heuristique, c'est-à-dire intuitif sans être assez

précis pour constituer une preuve mathématique, en faveur de l'hypothèse que tout nombre pair supérieur à 2 est somme de deux nombres premiers. Cette hypothèse, la conjecture de Goldbach, fut proposée en 1742 lors d'échanges épistolaires entre le mathématicien prussien Christian Goldbach et le prolifique et génial mathématicien suisse Leonhard Euler.

Les points les plus bas du nuage s'alignent et dessinent une courbe qui croît vers l'infini quand n augmente. Si ce que voit notre œil est vrai, alors la conjecture de Goldbach est vraie, car le nuage qui monte n'aura jamais de point sur l'axe des abscisses, donc tout entier pair $n \geq 4$ aura au moins une décomposition en somme de deux nombres premiers. Mieux, le nuage suggère la véracité d'une conjecture plus précise et plus difficile, la « conjecture forte de Goldbach » : si, comme on l'observe, le nuage monte toujours, alors

non seulement tout entier pair $n \geq 4$ s'écrit comme somme de deux nombres premiers d'une façon au moins, mais en fait n s'écrit d'un nombre k de façons qui tend vers l'infini quand n tend vers l'infini.

En 2012, le mathématicien australien Terence Tao a démontré que tout nombre impair (à partir de 5) est somme de cinq nombres premiers ou moins, résultat amélioré l'année suivante par Harald Helfgott, qui a prouvé que tout nombre impair ≥ 5 est somme de trois nombres premiers. Ces résultats qui sont des variantes du résultat recherché pour les nombres pairs font espérer que nous approchons d'une vraie démonstration de la conjecture de Goldbach.

Nous nous sommes jusqu'ici intéressés à des ensembles de nombres. Or plusieurs procédés permettent de tirer une image régulière ou aléatoire (parfois d'aspect fractal) d'un seul nombre. Ces

2. Les spirales d'Ulam et de Sacks

La spirale de Stanislaw Ulam (1909-1984) s'obtient en dessinant les nombres entiers sur une spirale carrée, puis en noirissant les nombres premiers. Les alignements obliques de points noirs que l'œil perçoit d'emblée sont d'une étonnante netteté. La formule d'Euler $n^2 - n + 41$ donne des nombres premiers pour n variant de 0 à 40. La formule engendre des nombres premiers dans 47,5 % des cas lorsque n est inférieur à 10 000 000. En utilisant sa spirale, Ulam découvrit d'autres formules du même type qui expliquent certains alignements, sans qu'on sache justifier clairement pourquoi il y en a tant.

La spirale de Robert Sacks a été proposée en 1994 et redécouverte indépendamment par Jean-François Colonna en 1999. On l'obtient en plaçant les nombres entiers sur une spirale d'Archimède : à chaque tour, la courbe s'éloigne du centre d'une même distance, et sur le tour numéro n , on place les entiers compris entre n^2 et $(n+1)^2$. Comme pour la spirale d'Ulam, la disposition des nombres premiers fait apparaître un grand nombre de tracés dont la compréhension reste aujourd'hui assez limitée (voir une étude détaillée en <http://www.numberspiral.com/index.html>).

Jean-François Colonna

999 999,999999999999999999999999
999979999999999999999999999999
999991999999999999999999999999
999995199999999999999999999999
999996639999999999999999999999
999997446399999999999999999999
999997957119999999999999999999
999998307327999999999999999999
9999985612287999999999999999999

Tout entier pair supérieur à 2 semble s'écrire comme une somme de deux nombres premiers : $4 = 2 + 2$, $6 = 3 + 3$, $8 = 5 + 3$, $10 = 3 + 7 = 5 + 5$, $12 = 5 + 7$, $14 = 3 + 11 = 7 + 7$, etc. Pourtant, nul ne sait le démontrer. La remarque a été faite il y a plus de deux siècles dans un échange de lettres entre Christian Goldbach et Leonhard Euler. Si, pour chaque entier pair n , on calcule le nombre k de façons d'écrire n comme somme de deux nombres premiers et qu'on place le point de coordonnées (n, k) sur un graphique (les premiers points sont $(4, 1)$, $(6, 1)$, $(8, 1)$, $(10, 2)$, $(12, 1)$, $(14, 2)$, ...), on obtient un nuage de points nommé comète de Goldbach.

La régularité globale du nuage dessiné, où l'on observe une multitude de stries, et son désordre local apparent illustrent la régularité et l'irrégularité des nombres premiers. Comme pour les spirales de l'encadré 2, on obtient des explications partielles de ce qu'on voit, mais aucune n'est vraiment générale. D'ailleurs, si l'on savait expliquer et justifier la forme de la courbe limitant le bas du nuage, on prouverait sans doute qu'elle croît indéfiniment quand n augmente, et donc on prouverait la forme forte de la conjecture de Goldbach : le nombre de décompositions en somme de deux nombres premiers de l'entier pair n tend vers l'infini quand n tend vers l'infini. Malgré quelques progrès récents sur ce type de problèmes, personne n'a su pour l'instant démontrer la forme classique de la conjecture, et encore moins la forme forte... et donc encore moins justifier les détails de la comète.

Le graphique illustre le nuage de points de Goldbach. L'axe horizontal est noté n et l'axe vertical k . On observe une multitude de points qui forment des stries divergentes à partir de l'origine. Des valeurs de n (10^3 , 10^6) et k ($1,6 \times 10^4$) sont indiquées sur les axes.

Logique & calcul 81

6. Les figurations de nombres de Benoît Cloitre

Les promenades obtenues directement à partir des chiffres d'un nombre (voir l'encadré 5) sont, sauf dans de rares cas, décevantes et produisent des résultats d'allure semblable à une marche aléatoire. Mais Benoît Cloitre a découvert un intéressant procédé de choix de la direction de déplacement du point courant.

Un nombre réel r étant donné, avec deux paramètres entiers a et b (par exemple 3 et 1), il calcule la partie entière du produit $r(an + b)$ pour $n = 1, 2, 3, \dots$, puis, selon que le résultat est pair ou impair, il fait

tourner la direction de déplacement du point courant de $\pi/3$ ou de $-2\pi/3$ (d'autres angles peuvent être choisis et donnent aussi de surprenants résultats). On observe des promenades qui, cette fois, ne sont en rien aléatoires et qui, selon le nombre r , dessinent des figures géométriques complexes, mais toutes très spécifiques des nombres essayés. Pour chaque r , on est tenté de considérer le dessin produit comme une empreinte digitale de r (*digit* veut dire chiffre en anglais).

B. Cloitre a tiré plusieurs conclusions de l'étude de ses promenades.

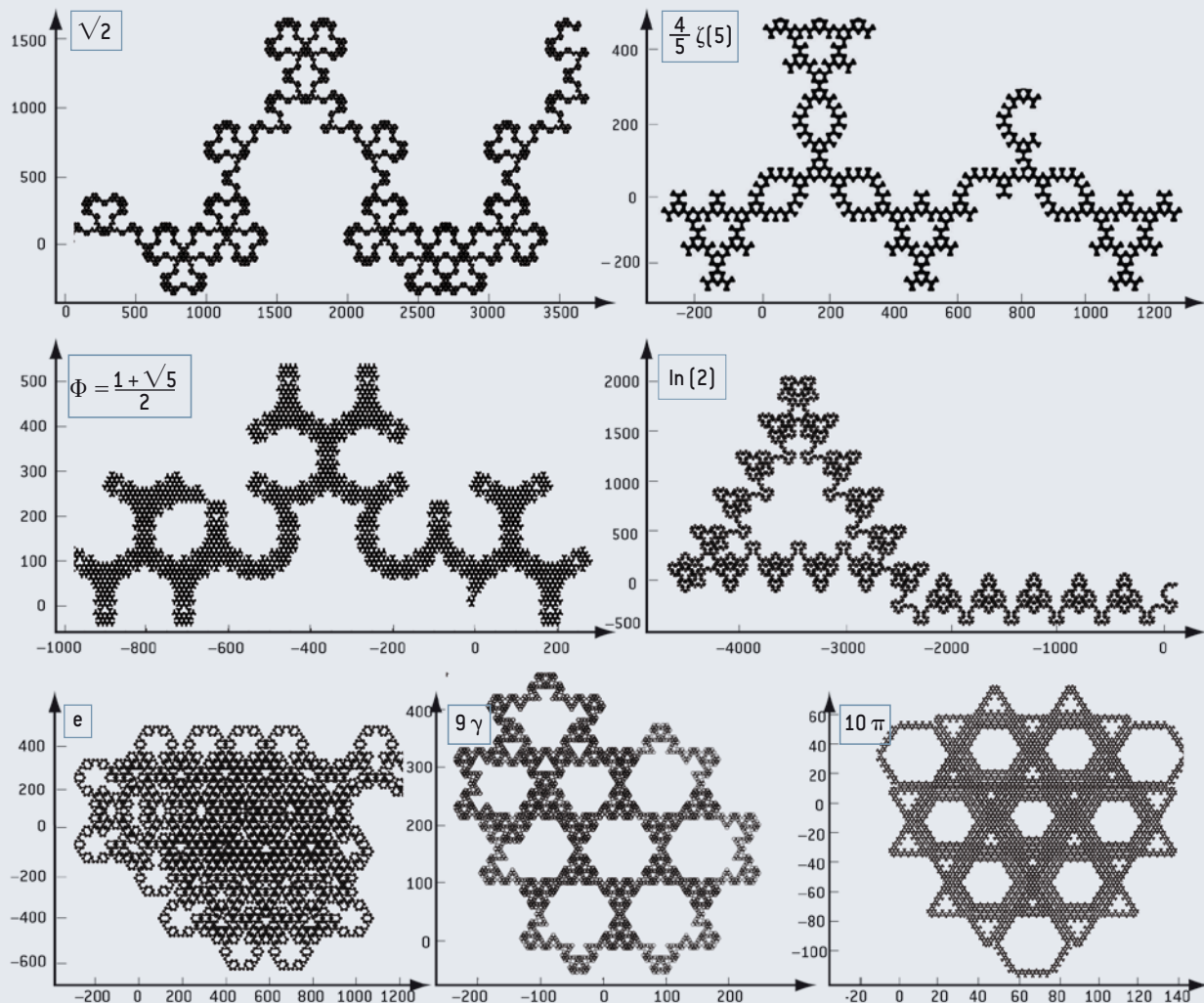
- Si le chemin est non borné et ne reste pas entre deux parallèles, alors la constante est irrationnelle (l'inverse n'est pas toujours vrai). Cette propriété (démontrée) fournit un outil pour prédire la nature irrationnelle ou non d'une constante.

- Les promenades sont souvent autosimilaires (on retrouve la forme générale en plus petit dans l'image). À chaque nombre, le procédé de B. Cloitre donne ainsi le moyen d'associer une forme d'allure fractale.

- On note des différences significatives entre les constantes. Les chemins pour $\sqrt{2}$ et ϕ (le nombre

d'or) se développent plus vite et ont plus d'amplitude le long de l'axe des x . Pour les multiples de π et de la constante mathématique γ (la limite de $1+1/2+1/3+\dots+1/n-\ln(n)$ quand n tend vers l'infini), il y a beaucoup de recouvrements et le cheminement se tasse. De toute évidence, ces promenades rendent visuelles des propriétés profondes des nombres.

Ici, chaque promenade est dessinée pour 1 500 000 étapes, pour $a = 1$ et $b = 0$. Voir : <https://dl.dropboxusercontent.com/u/46675017/FractalWalks16oct.pdf>



Benoît Cloitre

7. Les rideaux fractals

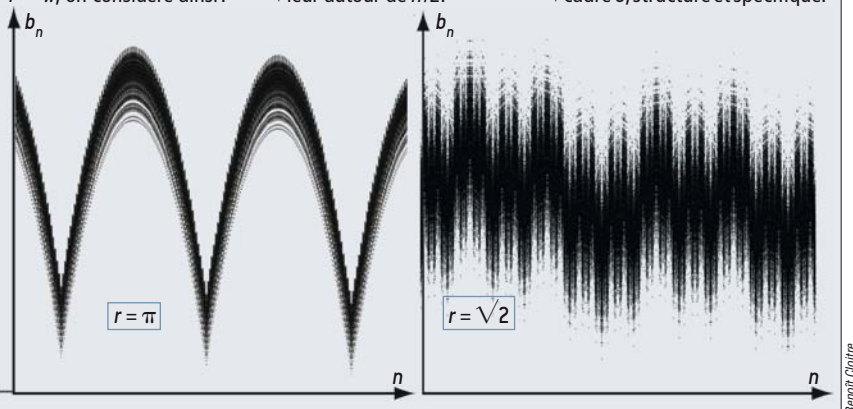
Un procédé inédit d'obtention d'empreintes de nombres a été récemment proposé par B. Cloitre.

Pour chaque nombre réel r , on s'intéresse à ses multiples $r, 2r, 3r, \dots$ dont on ne retient que la partie après la virgule. Pour $r = \pi$, on considère ainsi :

$r = 3,1415926 \rightarrow a_1 = 0,1415926$
 $2r = 6,28318530 \rightarrow a_2 = 0,28318530$
 $3r = 9,424777 \rightarrow a_3 = 0,424777$,
 et ainsi de suite.

On calcule les sommes $a_1 + a_2 + \dots + a_n$ de ces nombres. Comme chaque terme oscille autour de $1/2$, la somme a une valeur autour de $n/2$.

Pour obtenir une valeur centrée, on utilise donc le nombre $b_n = a_1 + a_2 + \dots + a_n - n/2$. En représentant de nombreuses valeurs de b_n (c'est-à-dire des points de coordonnées (n, b_n)), le dessin obtenu est, comme avec les promenades de l'encadré 6, structuré et spécifique.



Benoît Cloitre

construction de promenades sur le plan dont la définition se fonde, comme précédemment, sur un nombre réel unique. Ces procédés produisent bien d'autres choses que des mouvements browniens et, avec eux, les constantes préférées des mathématiciens deviennent visuellement distinctes [voir l'encadré 6].

Ces méthodes engendrent des images qui personnalisent les nombres et semblent exhiber leur identité profonde. La structure visuelle est très différente d'un nombre à l'autre, confirmant ce que bien des mathématiciens avaient perçu : chaque nombre a une identité cachée dans ses chiffres. L'image ainsi associée à un nombre peut être vue comme son empreinte « digitale » ou, pourquoi pas, son génome.

Avant B. Cloitre, d'autres méthodes avaient parfois réussi à faire ainsi émerger des images structurées des constantes, mais les procédés qu'il propose sont plus simples et énigmatiques. On est loin de comprendre ce qui se passe, mais déjà B. Cloitre en tire des conjectures et des arguments heuristiques. Ainsi, grâce aux promenades, il semble que la constante $\zeta(5)$ (la somme

infinie des $1/n^5$), dont on ignore aujourd'hui la nature, soit un nombre irrationnel.

Pour terminer, signalons encore une trouvaille toute récente de B. Cloitre : un procédé qui, comme ses promenades, associe des cartes de visite clairement distinctes aux constantes irrationnelles, cette fois sous la forme de « rideaux » géométriques [voir l'encadré 7] que l'on soupçonne être fractals (ce qu'on ne sait pas démontrer aujourd'hui).

De nouvelles formes de la beauté mathématique

Pour l'instant, nul ne sait ce que l'on réussira à tirer mathématiquement de ces dessins personnalisés des nombres. Il est cependant probable que les comprendre nous aidera à percer quelques mystères arithmétiques. Le mathématicien, s'il ne sait pas encore lire sur ces images géométriques, ne peut manquer de se réjouir de voir ses constantes préférées se dévoiler et révéler de nouvelles formes, jusque-là inconnues, de la beauté mathématique. ■

L'AUTEUR



J.-P. DELAHAYE est professeur à l'Université de Lille et chercheur au Laboratoire d'informatique fondamentale de Lille (LIFL).

BIBLIOGRAPHIE

Site de Benoît Cloitre, consulté en novembre 2013 : <http://bcmathematics.monsite-orange.fr/>

B. Cloitre, *Fractal curtains of irrational numbers*, 2013, <https://dl.dropboxusercontent.com/u/46675017/Fractalcurtains.pdf>

F. Aragon Artacho et al., *Walking on real numbers*, *Mathematical Intelligencer*, vol. 35(1), pp. 42-60, 2013 http://rua.ua.es/dspace/stream/10045/29042/1/2013_Aragon_etal_MathIntell.pdf

K. Cooney, *Visualising prime numbers*, *The Irish Undergraduate Mathematical Magazine*, vol. 1, pp. 17-26, 2012.

J.-P. Delahaye, *Être normal, pas si facile !*, *Pour la Science* n°422, pp. 126-131, décembre 2012.

R. Sacks, *Number spiral*, 2007, www.numberspiral.com

J.-P. Delahaye, *Les nombres zébrés*, *Pour la Science* n° 301, pp. 90-95, juillet 2004.

SCIENCE & FICTION

Le vol du banshee

Les monstres volants de la science-fiction ont des proportions qui interdiraient la plupart des prouesses dont leurs concepteurs les dotent.

Roland LEHOUCQ et J.-Sébastien STEYER

Les animaux fabuleux des mythologies ne hantent pas seulement les forêts et les montagnes, les océans et les lacs. On les trouve aussi dans les airs. L'une des créatures les plus célèbres de la mythologie grecque est Pégase, le cheval ailé qui permit à Bellérophon de vaincre la Chimère. Une autre créature emblématique est le dragon, dont la version occidentale est un gigantesque reptile écailleux et cracheur du feu, capable de voler grâce à des ailes membraneuses semblables à celles des chauves-souris. Citons également le griffon (un corps d'aigle greffé sur l'arrière d'un lion) qui apparaît en Élam à la fin du IV^e millénaire avant notre ère, l'hypogriffe (mi-cheval et mi-aigle) popularisé par la saga *Harry Potter*, ou le Roc, un oiseau gigantesque mentionné dans les contes des *Mille et Une Nuits* et dans les *Voyages de Sinbad le Marin*, capable d'enlever dans ses énormes serres des proies aussi grosses que des éléphants !

Science-fiction et *fantasy* ont aussi beaucoup contribué à étendre la « biodiversité » des organismes volants. On en trouve dans la saga *Star Wars*, tel Watto, le cupide marchand de pièces détachées de la planète Tatooine (*La Menace Fantôme*, 1999), ou le Bogwing de la planète Dagobah. La riche faune de la planète Pandora (*Avatar*, 2009) comprend aussi de splendides espèces, tel le banshee, un vertébré volant, ou son cousin prédateur le grand *Leonopteryx*.

Comme souvent, ces animaux imaginaires sont inspirés de la vie terrienne actuelle ou disparue. Ainsi, le banshee a incontestablement un air de parenté avec

les ptérosaures. Ces reptiles volants sont apparus au Trias supérieur, il y a 230 millions d'années, et ont disparu au Crétacé supérieur, il y a 65 millions d'années, en même temps que de nombreux dinosaures. Même s'ils partagent quelques caractéristiques avec les oiseaux, par exemple des os creux, ils forment un groupe à part entière. Les ptérosaures sont les premiers vertébrés à avoir acquis le vol battu. Les ailes des banshees ressemblent à celles des ptérosaures : une membrane attachée au corps et sous-tendue par les os des membres antérieurs.

Impossibles acrobaties ?

Or les indigènes de Pandora, les Na'vis, savent dompter les banshees pour en faire leurs montures volantes et exécutent avec eux de stupéfiantes acrobaties. Est-ce plausible ? En se déplaçant dans l'air, l'aile subit une force de portance qui résulte de l'action de l'air sur sa surface. Cette force est proportionnelle à la surface des ailes et au carré de la vitesse relative de l'aile par rapport à l'air. En effet, la force est due aux molécules qui rebondissent sur l'aile ; elle est proportionnelle au nombre de molécules frappant la surface et à leur vitesse. Ce nombre est, lui aussi, proportionnel à la vitesse ; par conséquent, la portance dépend du carré de la vitesse relative de l'aile par rapport à l'air. C'est pourquoi il est plus facile de décoller face au vent : à la vitesse de l'animal s'ajoute celle du vent, ce qui augmente d'autant la portance. Pour voler à altitude constante,



1. WATTO qui, dans la saga *Star Wars*, vit sur la planète Tatooine, est un personnage volant difficilement plausible, même avec ses battements d'ailes accélérés !