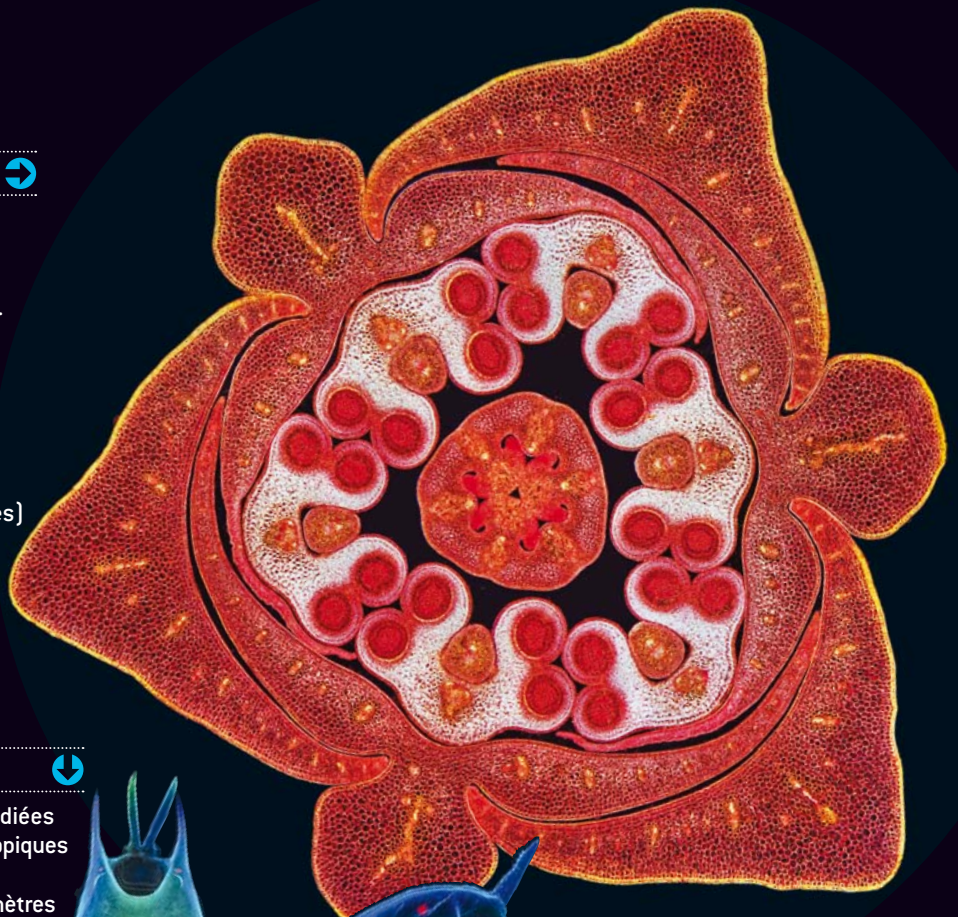


UN BOURGEON DE LYS



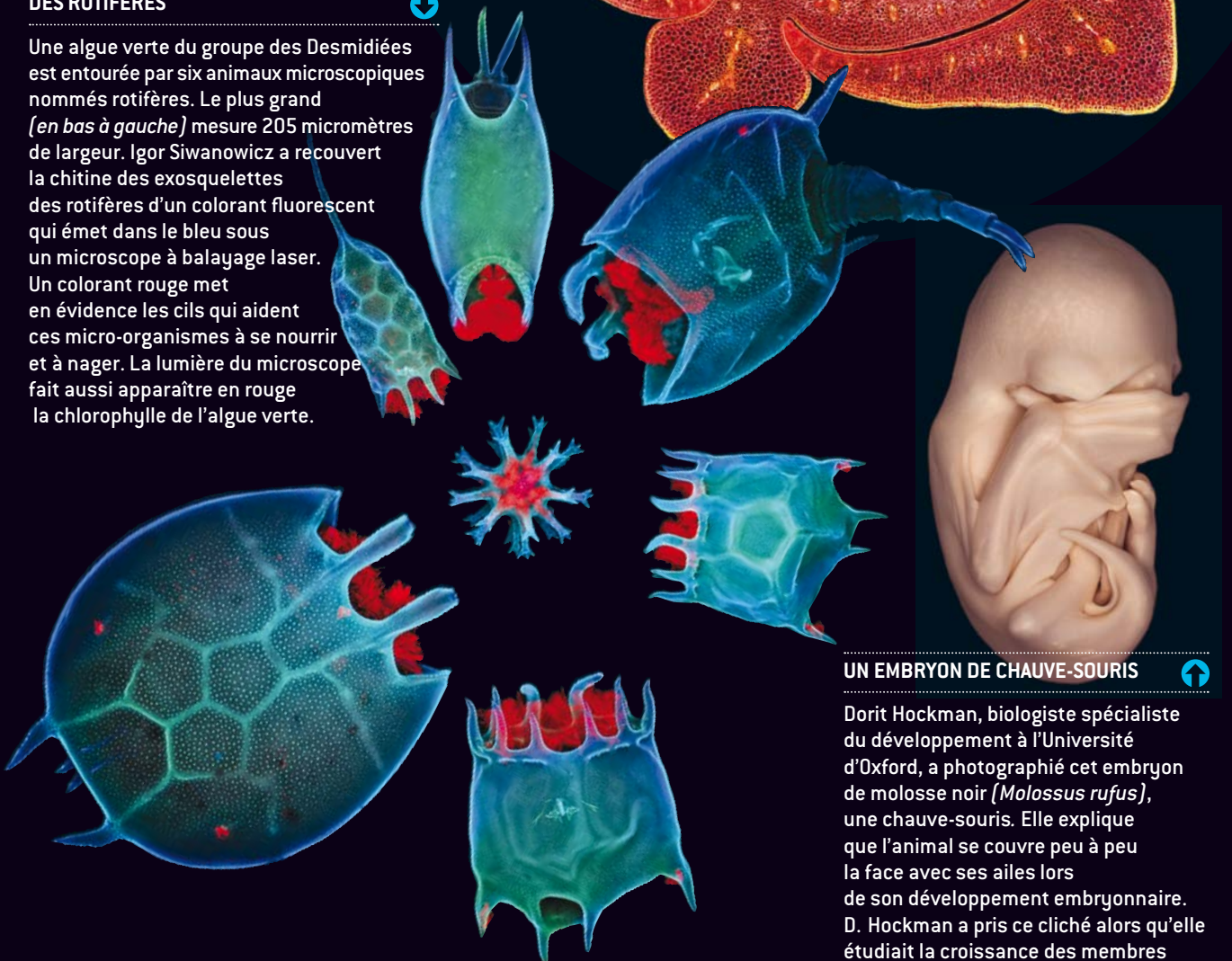
Spike Walker, de Penkridge au Royaume-Uni, a photographié une ancienne coupe de bourgeon de lys, large d'environ un centimètre. Il pense que le colorant utilisé était de la safranine. Comme toutes les plantes à fleurs du clade des monocotylédones, les fleurs de lys présentent trois carpelles (au centre) produisant les graines. Ils sont entourés de poches (anthères) remplies de pollen, l'ensemble étant cerné de trois pétales puis de trois grands sépales protecteurs.



DES ROTIFÈRES



Une algue verte du groupe des Desmidiées est entourée par six animaux microscopiques nommés rotifères. Le plus grand (en bas à gauche) mesure 205 micromètres de largeur. Igor Siwanowicz a recouvert la chitine des exosquelettes des rotifères d'un colorant fluorescent qui émet dans le bleu sous un microscope à balayage laser. Un colorant rouge met en évidence les cils qui aident ces micro-organismes à se nourrir et à nager. La lumière du microscope fait aussi apparaître en rouge la chlorophylle de l'algue verte.



UN EMBRYON DE CHAUVÉ-SOURIS



Dorit Hockman, biologiste spécialiste du développement à l'Université d'Oxford, a photographié cet embryon de molosse noir (*Molossus rufus*), une chauve-souris. Elle explique que l'animal se couvre peu à peu la face avec ses ailes lors de son développement embryonnaire. D. Hockman a pris ce cliché alors qu'elle étudiait la croissance des membres antérieurs des vertébrés, structures qui peuvent prendre la forme tant d'une aile souple que d'une petite patte de souris.

Ferris JABR est journaliste à *Scientific American*.

Le site du concours *Olympus BioScapes* :
www.OlympusBioScapes.com

HISTOIRE DES SCIENCES

Pourquoi ils n'ont pas cru Copernic

Quand, en 1543, Nicolas Copernic affirma que la Terre tourne autour du Soleil, l'opposition ne vint pas seulement des autorités religieuses. Les observations privilégiaient une autre cosmographie.

Dennis Danielson et Christopher Graney

En 2011, des physiciens du CERN, à Genève, ont envoyé un faisceau de neutrinos vers le Laboratoire Gran Sasso de L'Aquila, en Italie, distant de 730 kilomètres. D'après le chronométrage du temps de trajet, les neutrinos avaient voyagé plus vite que la lumière dans le vide. Comment ce résultat surprenant a-t-il été accueilli ? La plupart des scientifiques, plutôt que de remettre en cause les préceptes bien établis d'Albert Einstein (selon lesquels rien ne se déplace plus vite que la lumière), ont supposé que les mesures des chercheurs étaient erronées (de fait, elles l'étaient).

Projetez-vous à présent quatre siècles plus tard, à une époque où les idées d'Einstein seraient dépassées ; dans ce futur, les scientifiques ont depuis longtemps confirmé par l'expérience que les neutrinos peuvent se propager plus vite que la lumière. Comment interpréterions-nous alors, avec le recul, la réticence des physiciens d'aujourd'hui à accepter les preuves ? En concluons-nous qu'ils étaient enfermés dans leur vision des choses ? Peu réceptifs aux idées nouvelles ? Peut-être motivés par des considérations non scientifiques – une clique d'einsteinien étroits d'esprit respectant la ligne dictée par la tradition et l'autorité ? Espérons qu'ils auraient un meilleur traitement : la réticence à abandonner des conclusions d'apparence solide est une attitude raisonnable en science.

De tels récits ne manquent pas dans l'histoire des sciences. Supposant que la Voie lactée constituait l'Univers tout entier, les

astronomes du XIX^e siècle, en observant les premières images de la galaxie d'Andromède, ont cru à tort, mais non sans raison, qu'ils voyaient une étoile unique entourée d'un système solaire naissant, et non, comme on le sait aujourd'hui, un objet lointain comptant un billion d'étoiles. De même, Einstein était persuadé que l'Univers était statique, et la constante cosmologique qu'il a introduite dans ses équations n'avait d'autre objectif que de garantir cette propriété. Ces deux hypothèses étaient raisonnables – mais toutes deux erronées, a-t-on appris avec le recul.

Dans le cas des neutrinos, certes, nous avons peu de recul. Nous connaissons en revanche le fin mot de l'histoire de l'astronome polonais Nicolas Copernic (1473-1543) et de sa théorie de l'héliocentrisme, selon laquelle la Terre tourne sur elle-même en un jour et effectue chaque année une révolution autour du Soleil – ce que tout le monde admet aujourd'hui. Le système copernicien remettait en cause l'idée bien ancrée, codifiée par l'astronome grec du II^e siècle Ptolémée dans son œuvre *l'Almageste*, que le Soleil, la Lune et les étoiles tournaient autour d'une Terre immobile au centre de l'Univers.

Copernic a proposé ses idées révolutionnaires en 1543, dans son livre *De Revolutionibus Orbium Caelestium*. De nombreux scientifiques l'ont lu, l'ont admiré, l'ont annoté et l'ont utilisé pour améliorer leurs prédictions astronomiques. Malgré cela, en 1600, soit 57 ans après sa publication, à peine plus d'une dizaine d'astronomes avaient renoncé à leur conviction que la Terre est immobile. La plupart

des scientifiques continuaient à préférer le géocentrisme, plus proche de l'expérience sensible du lever et du coucher du Soleil.

On entend parfois que ce refus de l'héliocentrisme était le fait de préjugés qui n'ont été surmontés que lorsque Galilée a assemblé une lunette astronomique en 1609 et observé les étoiles, la Lune et les planètes. C'est faux. Longtemps après 1609, les astronomes avaient encore des raisons scientifiquement valables de douter des affirmations de Copernic. Leur histoire illustre comment de bonnes raisons peuvent conduire des chercheurs à résister à des idées nouvelles qui, parfois, se révèlent correctes.

Tycho Brahe et ses doutes

Le doute était entretenu en particulier par les travaux de l'astronome danois Tycho Brahe, qui proposa en 1588 un autre type de système géocentrique (*voir l'encadré page 76*). Bien que son système n'ait pas la cohérence de ceux de Ptolémée et de Copernic (Galilée ne s'y était pas trompé, lui qui, dans son *Dialogue* publié en 1632, ne s'intéresse qu'à ces derniers), il a deux avantages majeurs : il s'accorde bien aux intuitions que l'on a de l'Univers et il décrit mieux les données disponibles que le modèle de Copernic.

Brahe en impose. Il dirige un important programme de recherches dans un observatoire immense – une citadelle de l'astronomie construite sur une île –, avec un budget comparable à celui de la NASA aujourd'hui, qui lui permet d'avoir les meilleurs instruments

du moment. Ce sont les données de Brahe sur Mars que Johannes Kepler, un de ses assistants, utilisera plus tard pour découvrir la nature elliptique du mouvement des planètes.

Brahe a été impressionné par l'élégance du système copernicien, mais certains aspects le gênent. Notamment, il manque au modèle de Copernic une explication physique du mouvement de la Terre (l'explication ne viendra qu'un bon siècle plus tard, avec la physique newtonienne). D'un diamètre estimé à plusieurs milliers de kilomètres, cette boule de roches et de terre doit avoir une masse énorme. Qu'est-ce qui pourrait faire tourner un tel corps autour du Soleil, alors qu'il est déjà difficile de tirer un chariot chargé ?

En revanche, le mouvement des corps célestes tels que les étoiles et les planètes est facile à expliquer : depuis l'époque d'Aristote, les astronomes postulent que les astres sont constitués d'une substance spéciale dite éthérée, qui n'existe pas sur Terre. Cette substance tend à adopter un mouvement circulaire rapide, de la même façon que le chariot a tendance à s'arrêter si on ne le tire pas énergiquement. Selon Brahe, le système copernicien « évite savamment et entièrement tout ce qu'il y avait de superflu ou de discordant dans le système de Ptolémée. [...] Mais il attribue à la Terre, à ce corps grossier, paresseux, inhabile au mouvement, un mouvement tout aussi rapide qu'à ces flambeaux éthérés » (*Opera omnia*, vol. 4).

Un autre aspect dérange Brahe dans le système copernicien : la taille des étoiles. Ptolémée a dit que la sphère des étoiles est « incommensurablement grande » parce qu'on ne détecte aucune parallaxe diurne, c'est-à-dire aucune modification notable de la position apparente des étoiles lorsque, au fil de la nuit, l'angle et la distance d'observation changent avec la course des étoiles dans le ciel. Le diamètre de la Terre est donc négligeable comparé aux distances stellaires : la Terre est « comme un point », écrivait Ptolémée.

Mais Copernic sait qu'on ne détecte même pas de parallaxe annuelle, c'est-à-dire un changement des positions relatives apparentes des étoiles dû au déplacement de la Terre sur son orbite. Or si la Terre tourne autour du Soleil, l'absence de parallaxe annuelle implique que le diamètre de son

■ LES AUTEURS

Dennis DANIELSON
est professeur d'anglais
à l'Université de Colombie-
Britannique, au Canada.

Christopher GRANEY
est professeur de physique
et d'astronomie au *Jefferson*
Community and Technical
College de Louisville,
dans le Kentucky (États-Unis).

orbite est lui-même insignifiant, « comme un point » comparé aux distances stellaires. La taille de l'Univers devient alors un nouvel « incommensurablement grand », d'échelle difficile à concevoir.

Cette conséquence concerne aussi la taille des étoiles. Quand on regarde le ciel nocturne, chaque étoile semble avoir une certaine largeur angulaire, qui a été mesurée par Ptolémée comme par Brahe. On sait aujourd'hui que les étoiles lointaines sont des sources ponctuelles de lumière, et que ces largeurs apparentes sont un artefact lié

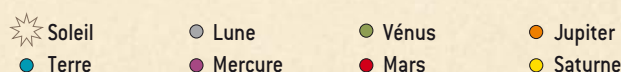


COPERNIC, vu par l'artiste Kirk Caldwell.

Toutes les illustrations sont de Kirk Caldwell

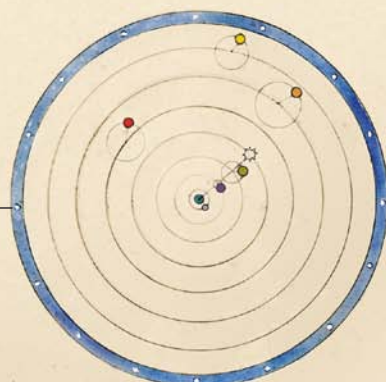
Les cosmographies anciennes

Les astronomes du XVII^e siècle avaient trois modèles pour décrire l'Univers. Dans le modèle géocentrique, la Terre était immobile au centre, et le Soleil, la Lune, les planètes et les étoiles tournaient autour. Les astronomes rendaient compte du mouvement rétrograde des planètes en introduisant des « épicycles », de petits cycles se superposant aux orbites principales. Le système héliocentrique (le Soleil au centre) de Nicolas Copernic était plus simple en apparence, mais il soulevait de nouvelles difficultés ; par exemple, les étoiles devaient se trouver à des distances difficiles à concevoir. Le modèle géo-héliocentrique de Tycho Brahe était intermédiaire : le Soleil, la Lune et les étoiles tournaient autour de la Terre centrale, tandis que les planètes tournaient autour du Soleil, ce qui permettait que les étoiles soient à des distances acceptables pour l'époque.



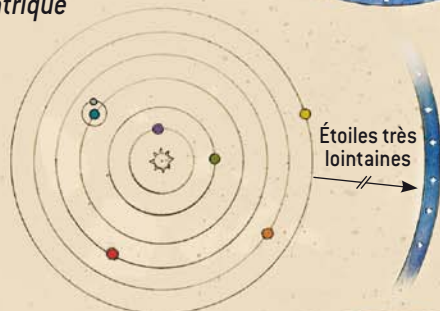
Modèle géocentrique

Sphère céleste (étoiles)

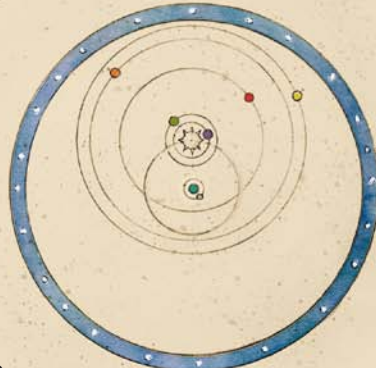


Modèle héliocentrique

Étoiles très lointaines



Modèle géo-héliocentrique



Les planètes et orbites ne sont pas à l'échelle

au passage des ondes lumineuses à travers une ouverture circulaire telle qu'une lunette astronomique ou la pupille de l'œil.

Mais à l'époque, les astronomes ne savent rien de la nature ondulatoire de la lumière. Utilisant la géométrie élémentaire, Brahe calcule que si les étoiles se trouvent à des distances coperniciennes, leur largeur devrait être comparable à celle de l'orbite terrestre proposée par Copernic. Même à côté de la plus petite des étoiles, le Soleil serait minuscule. Difficile à croire ! Pour Brahe, ces étoiles titanesques sont absurdes.

Plutôt que d'abandonner leur théorie devant de tels arguments physiques, les coperniciens invoquent l'omnipotence divine. « L'étendue de l'Univers et la taille des étoiles peuvent être aussi grandes que vous le voulez – cela sera toujours peu de chose pour le Créateur infini », écrit le copernicien Christoph Rothmann dans une lettre à Brahe.

Ne se laissant pas influencer par de tels arguments, Brahe propose son propre système : le Soleil, la Lune et les étoiles tournent autour d'une Terre immobile, comme dans le système ptoléméen, tandis que les planètes tournent autour du Soleil, comme dans le système copernicien.

Ce système conserve les avantages du géocentrisme. Avec lui, pas de mouvement de la Terre à expliquer ni de problème de parallaxe annuelle exigeant des étoiles géantes extrêmement lointaines : les étoiles du système de Brahe sont juste un peu plus lointaines que les planètes, et de taille tout à fait raisonnable. Mais concernant les planètes, les systèmes de Brahe et de Copernic sont mathématiquement identiques. Ainsi, le système de Brahe conserve aussi l'élégance copernicienne qu'il admire.

Quand Galilée scrute les cieux avec sa lunette, il fait plusieurs découvertes qui contredisent la cosmographie de Ptolémée. Il observe que Jupiter a des lunes, ce qui prouve que l'Univers peut présenter plusieurs centres de mouvement. Il observe aussi les phases de Vénus, montrant qu'elle tourne autour du Soleil. Ces découvertes ne sont cependant pas comprises comme des preuves que la Terre tourne autour du Soleil, puisqu'elles restent compatibles avec le système de Brahe.

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

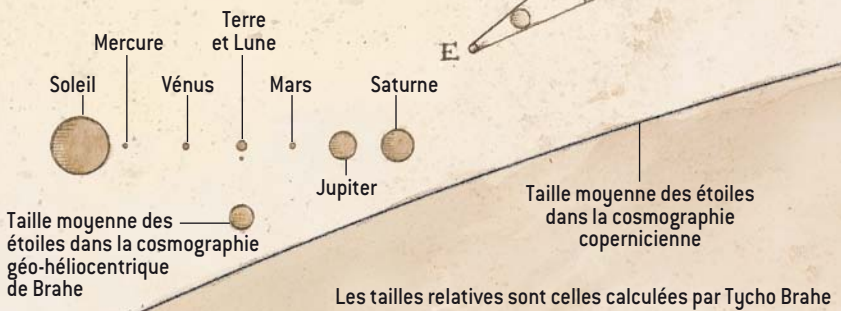
Le premier argument est fondé sur l'incapacité à détecter les effets qu'une planète tournant sur elle-même devrait, explique Riccioli, exercer sur les projectiles et les corps en chute libre. Reprenant une idée d'Aristote, Brahe pensait qu'une Terre en rotation devrait dévier la trajectoire d'un tir 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, décrétant 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 0,111111... (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