

3) Quand on lit la k -ième lettre de M_n , on trace un segment en suivant la direction que l'on a.

4) Si la k -ième lettre lue est un 1, on garde la même direction.

5) Si la k -ième lettre lue est un 0, on tourne vers la droite si k est pair, et vers la gauche si k est impair.

Les courbes ainsi construites (voir l'encadré 3) ne se recoupent jamais. Elles se classent en trois catégories, selon que l'indice du mot utilisé est un multiple de 3, un multiple de 3 additionné de 1, un multiple de 3 additionné de 2. Si l'on s'intéresse à toutes les courbes correspondant aux multiples de 3, en les tournant et en les ramenant à la même taille, il apparaît que les courbes convergent vers une forme unique très découpée. Cette forme limite a été étudiée par l'amateur français Alexis Monnerot-Dumaine en 2008. Le facteur d'agrandissement entre le dessin correspondant à l'indice k et le dessin pour l'indice $k+3$ est $1+\sqrt{2}$, et la dimension fractale (ou dimension de Hausdorff) de la figure limite est :

$$3 \log \phi / \log(1+\sqrt{2}) = 1,6379...$$

Rappelons que la dimension de Hausdorff d'une courbe lisse (cercle, droite, parabole, etc.) est 1, que la dimension de Hausdorff d'un morceau de surface plein (disque, carré rempli, etc.) est 2. La valeur 1,6379... trouvée pour la figure associée aux mots de Fibonacci prouve donc sa nature fractale au sens rigoureux du terme : cette figure est de dimension non entière, ici comprise entre 1 et 2.

La frontière de cette fractale est aussi très découpée. C'est une autre figure fractale, dont la dimension est plus petite ($\log 3 / \log(1+\sqrt{2}) = 1,2465...$) que la précédente.

De manière remarquable, d'autres procédés de construction conduisent à cette même forme fractale. En voici deux.

On sait que le célèbre tapis de Sierpiński s'obtient par évidements successifs : un carré plein est divisé en 9 carrés identiques ; on retire le carré central ; on recommence avec les 8 carrés restants, etc. La fractale de Fibonacci s'obtient aussi par évidements successifs : on part d'un rectangle plein de côtés 1 et $\sqrt{2}$, on enlève un carré de côté $1/\sqrt{2}$ au milieu en bas du rectangle, puis on recommence en enlevant à chaque étape une série de carrés dont la taille est divisée d'une étape à l'autre par $1+\sqrt{2}$ et dont la position suit une règle facile à comprendre en observant les deux premières étapes (voir l'encadré 3).

À la grande surprise de tous, Ron Knott a découvert un procédé encore plus simple pour arriver à cette fractale de Fibonacci : on suit les chiffres d'un mot de Fibonacci en traçant des segments de longueur 1 comme dans la première construction, mais maintenant on tourne à droite ou à gauche à chaque nouvelle lettre,

en changeant de direction pour tourner quand la lettre lue est 1.

Une idée très naturelle de généralisation de la suite de Fibonacci faisant intervenir le hasard est la suivante : on pose $R_0=0$, $R_1=1$ et, pour tout entier $n>1$, $R_n=R_{n-1}+R_{n-2}$ ou $|R_{n-1}-R_{n-2}|$ avec une probabilité $1/2$ pour chaque cas.

Autrement dit, à chaque nouveau nombre calculé, on choisit au hasard, avec une probabilité $1/2$, d'additionner les deux derniers, ou de les soustraire l'un à l'autre sans s'occuper du signe du résultat.

Un remarquable résultat a été établi au sujet de ces suites aléatoires de Fibonacci par Divakar Viswanath, de l'université du Michigan : avec une probabilité 1, la suite $R_n^{1/n}$ converge vers une constante réelle V égale à 1,132...

Cette nouvelle constante mathématique jamais rencontrée auparavant a bien sûr été dénommée constante de Viswanath. Elle est très mal connue et ceux qui s'y sont intéressés sont en désaccord dès sa quatrième décimale. Certains prétendent que c'est 1,132150... alors que d'autres affirment que c'est 1,131988... Un lecteur pourra-t-il mener des calculs qui tranchent la question ?

Notons que l'expression « avec une probabilité 1 » signifie qu'il y a autant de chances d'obtenir une autre limite que la constante de Viswanath qu'il y a de chances de tomber toujours sur pile en lançant indéfiniment une pièce de monnaie non truquée dans une série infinie de tirages à pile ou face.

L'ARBRE DE FIBONACCI

On peut représenter toutes les suites aléatoires de Fibonacci à l'aide d'un arbre. Si l'on ne souhaite représenter que les suites qui ne repassent pas par un même couple de nombres consécutifs (car c'est en quelque sorte revenir en arrière), dessiner l'arbre de toutes les suites aléatoires de Fibonacci devient simple (voir l'encadré 4). Ce nouvel arbre mathématique, introduit par Benoît Rittaud, de l'université Paris 13, présente d'intéressantes propriétés :

- le nombre de nœuds de niveau n est donné par la suite de Fibonacci ;

- la somme S_k des nombres de la ligne k vérifie $S_k = 2S_{k-1} + S_{k-3}$.

Surtout, cet arbre présente l'extraordinaire et inattendue propriété que tout couple d'entiers (a, b) premiers entre eux apparaît une fois exactement avec a juste au-dessus de b et que le chemin qui y mène est directement lié à la fraction continue du nombre a/b .

On le voit, loin de s'épuiser, l'intérêt pour la suite de Fibonacci et les objets apparentés semble s'étendre et produire sans cesse des idées, théorèmes et conjectures qui enrichissent la connaissance des procédés élémentaires de construction associés et leurs mystères. ■

BIBLIOGRAPHIE

K. Hare et J. C. Saunders, **On (a, b) pairs in random Fibonacci sequences**, prépublication arXiv:1608.03522, 2016.

S. Eliahou, **Mystères arithmétiques de la suite de Fibonacci, Images des Mathématiques**, 2014 : <http://bit.ly/2rzvvtvJ>

A. Monnerot-Dumaine, **The Fibonacci Word fractal**, 2009 : <http://bit.ly/2rzgiCv>

B. Rittaud, **On the average growth of random Fibonacci sequences**, *Journal of Integer Sequences*, vol. 10, article 07.2.4, 2007.

Y. Bugeaud et al., **Classical and modular approaches to exponential Diophantine equations I. Fibonacci and Lucas perfect powers**, *Annals of Mathematics*, vol. 163, pp. 969-1018, 2006.

L'AUTEUR



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

L'ATTAQUE DES FÉROCES ESCARGOTS

Dans nombre d'enluminures du Moyen Âge,
des chevaliers combattent de terrifiants... escargots.
Comment expliquer de telles joutes sans pitié?

D

ans *Monty Python: Sacré Graal!*, film sorti en 1975, un épisode célèbre met en scène le terrible lapin tueur de Caerbannog, égorgeur de chevaliers, dont seule la sainte Grenade d'Antioche viendra à bout. On pourrait réécrire la scène en remplaçant le petit animal à grandes oreilles avec un autre encore moins dangereux de réputation: l'escargot. Pourquoi un escargot? Pour les mêmes raisons qu'un lapin!

Tous les deux apparaissent à plusieurs reprises sous la forme d'enluminures dans

les marges de nombreux manuscrits médiévaux. Le plus souvent, ils sont aux prises avec des chevaliers armés dans des combats féroces. Le folio 16 du *Festal Missal*, rédigé à Amiens en 1323 par Garnerus de Morolio et illustré par Petrus de Raimbaucourt, est un bel exemple (*ci-contre*). Le gastéropode projette ses tentacules comme des lances vers un couple qui n'en mène pas large malgré son arsenal (épée, poignard, bouclier...). Comment expliquer ce motif récurrent?

Ce type d'enluminures est à classer parmi les «drôleries», des facéties picturales qui n'ont rien à envier à l'exubérance des tableaux de Jérôme Bosch, par exemple le *Jardin des délices*. Que ces fantaisies relèvent du pur amusement ou, pour certaines, de la subversion n'empêche pas de s'interroger sur une éventuelle source d'inspiration. De fait, ces drôleries témoignent du sens de l'humour et des préoccupations de l'époque.



L'ultime combat
de l'homme
et de la bête...

Les combats de chevaliers contre les escargots seraient d'abord apparus en France au XIII^e siècle avant d'essaimer en Angleterre et en Flandres. Étonnamment, d'où qu'ils viennent, les combats se ressemblent beaucoup dans leur mise en scène, au point que l'on peut supposer une transmission de pays à pays.

Plusieurs spécialistes ont tenté d'interpréter ces images. Selon des historiens, ces affrontements seraient une critique de la lâcheté, un lourd péché à cette époque très religieuse. Jean de Dunois, noble et militaire du XV^e siècle, et compagnon d'armes de Jeanne d'Arc, y voyait plutôt une métaphore de la



résurrection du Christ... sortant de sa coquille. Plus récemment, l'historien Lilian Randall propose de relier les escargots aux lombards, des prêteurs sur gages – et parfois usuriers – du Moyen Âge (ce métier serait né en Lombardie, en Italie, d'où leur nom). L'image peu flatteuse d'un corps mou aurait été associée à ce corps de métier peu digne de confiance.

Enfin, d'autres explications sont plus explicites et renvoient à de réels escargots, notamment ceux qui saccageaient régulièrement le vignoble français. De tels nuisibles méritaient d'être combattus, les chevaliers des enluminures

symbolisant les agriculteurs qui devaient quotidiennement lutter contre ce fléau à coquille. De fait, les escargots sont liés depuis toujours à la vigne dont ils apprécient particulièrement les bourgeons et les jeunes feuilles. Ils demeurent un problème pour les viticulteurs actuels. Les drôleries feraient ainsi état d'un combat permanent des humains contre un ravageur des cultures.

Une cause similaire expliquerait la présence des lapins. Dans son *Histoire naturelle*, l'écrivain romain du 1^{er} siècle Pline l'Ancien (très estimé au Moyen Âge) raconte que les habitants des îles Baléares ont réclamé auprès des

autorités romaines des soldats pour exterminer les prolifiques lapins qui détruisaient les cultures et entraînaient des famines. Des soldats ont donc bien combattu des lapins, des animaux tueurs (*via* les disettes). Cet épisode a pu inspirer les enlumineurs et les érudits Monty Python.

Les escargots et les lapins renvoient les dragons, loups et autres prédateurs au rang de bestioles inoffensives et toutes mignonnes... ■



Retrouvez la rubrique
Art & science sur
www.pourlascience.fr

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

CONCENTRÉS DE LUMIÈRE

Pour concentrer beaucoup de lumière sur une petite surface, on peut utiliser une loupe ou un autre système analogue. Mais ce n'est pas le plus efficace. On fait beaucoup mieux avec des systèmes optiques «non imageants», composés par exemple de miroirs paraboliques.

Pour concevoir des fours solaires, des torches ou des phares performants, on s'efforce de réaliser des faisceaux qui concentrent la lumière dans une région limitée de l'espace. Or les systèmes optiques qui forment des images – loupe, objectifs ou autres – ne sont pas les plus performants.

Imaginons que l'on cherche à concentrer la lumière du Soleil sur une pastille de 1 centimètre de diamètre à l'aide d'une loupe (une simple lentille convergente). L'image du Soleil se forme dans le plan focal de la lentille. Pour qu'elle soit plus petite que la pastille, il faut une focale de moins de 1 mètre, étant donné le diamètre apparent du Soleil (de l'ordre de 32 minutes d'arc, soit un centième de radian). La puissance reçue par la pastille sera alors proportionnelle à la surface de la loupe.

N'y a-t-il alors pas de limite à la concentration et à la puissance obtenue? Si, et un dispositif imaginé en 1982 par le physicien américain Roland Winston l'illustre bien. Considérons deux sources lumineuses identiques A et B, ponctuelles et isotropes (émettant de façon égale dans toutes les directions), placées dans une cavité parfaitement réfléchissante constituée de l'union d'une sphère centrée sur A et d'un ellipsoïde de révolution dont les foyers sont A et B (voir le schéma page ci-contre).

UN DISPOSITIF OPTIQUE QUI VIOLE LA THERMODYNAMIQUE?

Tous les rayons issus de A et réfléchis sur la partie sphérique de la cavité reviennent vers A. Il s'ensuit que plus de la moitié des rayons qui partent de A y reviennent, donc que moins de la moitié atteignent B. De l'autre côté, tous les rayons émis par B et réfléchis sur l'ellipsoïde se focalisent au point A. Ainsi, plus



de la moitié des rayons partant de B arrivent sur A. Les sources A et B étant identiques et isotropes, on en déduit que A reçoit plus d'énergie que B.

Roland Winston pointe alors un paradoxe si A et B sont des «corps noirs», censés absorber toute lumière incidente. Un tel corps émet une puissance lumineuse proportionnelle à T^4 , où T est sa température absolue. Si A et B sont initialement à la même température, le transfert d'énergie en faveur de A à l'œuvre dans le dispositif optique va briser cette égalité, et A deviendra plus chaud que B.

Ainsi, sans aucun travail, on aura pris de l'énergie à la source froide (B) pour la