

BIBLIOGRAPHIE

D. Maldonado et al., **Nontrivial turmites are Turing-universal**, *Journal of Cellular Automata*, vol. 13, pp. 373-392, 2018.

X. Wang et D. Xu, **A novel image encryption scheme using chaos and Langton's Ant cellular automaton**, *Nonlinear Dynamics*, vol. 79, pp. 2449-2456, 2015.

S. Hosseini et al., **Generating pseudo-random numbers by combining two systems with complex behaviors**, *Journal of Information Security and Applications*, vol. 19(2), pp. 149-162, 2014.

A. Gajardo et al., **Complexity of Langton's ant**, *Discrete Applied Mathematics*, vol. 117, pp. 41-50, 2002.

D. Gale et al., **Further travels with my ant**, *Mathematical Intelligencer*, vol. 17, pp. 48-56, 1995.

L. Bunimovich et S. Troubetzkoy, **Recurrence properties of Lorentz lattice gas cellular automata**, *Journal of Statistical Physics*, vol. 67, pp. 289-302, 1992.

C. Langton, **Studying artificial life with cellular automata**, *Physica D*, vol. 22, pp. 120-149, 1986.

LOGICIELS POUR TESTER LA FOURMI DE LANGTON

<http://golly.sourceforge.net>

<http://www.langtonant.com>

<http://www.dwmkerr.com/experiments/langtonsant/>

http://hai3.net/langtons_ant

Le «jeu de la vie» de John Conway, un célèbre système discret simple étudié depuis 1970, a été démontré universel. On a par exemple construit des configurations du jeu de la vie qui calculent la suite des nombres premiers, ou même qui définissent des machines de Turing quelconques, ce qui est un moyen efficace de démontrer qu'un système est universel.

Pour la fourmi de Langton, le problème se présentait assez mal à cause de la conjecture non démontrée que toute configuration finie du plan conduit la fourmi de Langton à construire une autoroute. Si la conjecture est vraie, alors il est impossible, en déposant un nombre fini de cellules noires sur le plan et une fourmi, de lancer une évolution calculant une infinité de valeurs $f(0), f(1), \dots, f(n), \dots$ car quand la fourmi se met à construire l'autoroute le calcul devient répétitif et est donc interrompu (sauf pour des fonctions f très simples).

La méthode des trois chercheurs de Santiago du Chili contourne l'apparente impossibilité d'une façon astucieuse dont le principe tient en trois points.

(1) Ils ont d'abord conçu des configurations finies de cases noires qui, quand on y dépose une fourmi, évoluent de manière à calculer une fonction booléenne, quelle qu'elle soit. Une fonction booléenne, par exemple $((a \text{ ou } b) \text{ et non-} c)$, selon les affirmations vraies ou fausses que l'on met à la place de a, b et c , indique si l'affirmation complexe $((a \text{ ou } b) \text{ et non-} c)$ est vraie ou fausse.

Si l'on prend pour a « $2+1=3$ », pour b «Paris est au Maroc», et pour c «le tabac est bon pour la santé», alors $(a \text{ ou } b)$ est vrai (car a est vrai), non- c est vrai, et donc $((a \text{ ou } b) \text{ et non-} c)$ est vraie.

À toute fonction booléenne $g(a, b, c, \dots)$, les chercheurs chiliens associent une configuration finie de cases noires telles qu'en fixant des valeurs booléennes pour $a, b, c, \dots$ et en modifiant quelques cases supplémentaires, la fourmi traversant la configuration laisse derrière elle une configuration de cases noires où l'on peut lire le résultat $g(a, b, c, \dots)$. Il convient de noter que le calcul d'une fonction booléenne est fini (il y a 2^n états possibles pour les n variables), et donc que la conjecture de l'autoroute n'interdisait pas cette construction.

(2) Avec ces calculateurs booléens, ils ont montré qu'on pouvait simuler n'importe quel automate cellulaire unidimensionnel.

Pour lancer le calcul infini d'un automate cellulaire de ce type, il faut au préalable noircir une infinité de cases du plan, selon un schéma répétitif. Cette préparation du plan est descriptible de manière finie (car répétitive), elle est donc acceptable dans la définition d'un système universel. Puisque cette préparation du plan introduit une infinité de cases noires, elle n'entrera pas en contradiction avec la conjecture de l'autoroute.

(3) Les chercheurs ont alors utilisé le résultat qu'il existe des automates cellulaires unidimensionnels universels. Ils en ont tiré que : pour toute fonction calculable $f(n)$, il existe une façon descriptible simplement et de manière finie de préparer le plan avec des cases noires et d'y déposer une fourmi de Langton qui en suivant son trajet transformera les zones où elle passera en laissant écrit derrière elle des configurations de cases noires représentant les valeurs de $f(0), f(1), \dots$. Précisons que si l'on change la fonction f , seules un nombre fini de cases doivent être changées dans la préparation du plan avant d'y lancer la fourmi.

La fourmi de Langton à elle seule a donc un pouvoir de calcul universel.

Il faut noter ici que l'article des trois chercheurs donne tous les détails pour effectuer les constructions, mais que celles-ci restent très difficiles à réaliser à cause de l'empilement des phases (1), (2) et (3), et qu'à ma connaissance la construction décrite n'a jamais été menée explicitement pour une fonction précise.

Une telle situation où l'on montre qu'une construction est possible sans la réaliser concrètement n'est pas nouvelle. John Von Neumann avait décrit dans les années 1940 un automate cellulaire autoreproducteur, qui n'a été concrètement programmé et mis en fonctionnement qu'en 1995. Cela illustre le pouvoir du raisonnement mathématique de démontrer l'existence d'objets sans avoir à les construire vraiment.

LA COMPLEXITÉ DES TURMITES

Le résultat de 2001 portant sur la fourmi de Langton a été généralisé en 2018 par une équipe autour de Diego Maldonado, de l'université d'Orléans, et réunissant à nouveau des chercheurs chiliens. Elle a montré que toute turmite non triviale, c'est-à-dire dont le nom n'est pas composé que de 0 ou que de 1, est universelle.

Les travaux se poursuivent et de nouvelles variantes de la fourmi ont été introduites et étudiées. En particulier, la variante du Polonais Pawel Tokarz, définie en 2018, modifie légèrement la règle de la fourmi en la faisant avancer à chaque étape de k cases (k fixé) au lieu d'une. Une variante programmable de la fourmi due à Mario Markus, Malte Schmick et Eric Goles produit une grande variété de déplacements linéaires différents de l'autoroute de Langton. La fourmi de Langton conduit aussi à des applications concrètes : en 2014, des chercheurs de l'université de Mechhed, en Iran, ont construit une fonction pseudoaléatoire utilisable en cryptographie en exploitant les comportements irréguliers de la merveilleuse fourmi et, en 2015, un schéma de chiffrement cryptographique d'images a été tiré du comportement de la fourmi par deux chercheurs de l'université de Dalian, en Chine. ■



L'AUTEUR



LOÏC MANGIN
rédacteur en chef adjoint
à Pour la Science

L'ASSASSIN ÉTAIT UN FICUS

Une exposition met en lumière la beauté, la richesse scientifique du monde végétal... et revient sur l'étrange affaire de l'arbre étrangleur.

D

ire que les plantes sont intelligentes, c'est les sous-estimer, affirme Francis Hallé, botaniste spécialiste des forêts tropicales. Pourtant, depuis Aristote, les arbres et tout le règne végétal sont cantonnés aux plus bas étages de l'évolution. Mais le mouvement s'inverse. Ces dernières années, les plantes font l'objet d'un engouement sans pareil. C'est que, d'abord, la survie de l'humanité en dépend. Ainsi, à Paris, la mairie envisage de planter plusieurs forêts urbaines pour contenir les hausses des températures; tandis qu'une étude parue en juillet dans *Science*, menée par Thomas Crowther, de l'ETH, à Zurich, en Suisse, préconise de planter... 1000 milliards d'arbres pour réduire le réchauffement climatique mondial.

Ensuite, la science a redécouvert l'arbre. Les chercheurs mettent en évidence ses prouesses en termes de communication, de sensibilité, d'adaptation et, même, d'une certaine forme d'intelligence. Plus encore, l'arbre apparaît désormais indispensable au bien-être humain, comme l'atteste l'essor des bains de nature (le *shinrin yoku* japonais).

Il n'empêche, l'arbre ne va pas fort, comme en témoigne la déforestation débridée qui touche tous les continents, à commencer par l'Amérique du Sud, où l'Amazonie rétrécit dangeureusement.

À la Fondation Cartier, à Paris, l'exposition «Nous, les arbres» s'inscrit dans cet élan et invite à réinventer notre regard sur les arbres, «des extraterrestres à nos yeux», selon Francis Hallé. Conçue par des artistes, des botanistes, des philosophes, la manifestation s'articule autour de trois axes, trois «trons»: la connaissance, l'esthétique et l'avenir. Le botaniste, pionnier de cette «réhabilitation des arbres» et inventeur du radeau des cimes y présente nombre de ses dessins. Ils associent l'œil du scientifique, son sens de l'observation, et celui, esthétique et poétique, de l'artiste.

Prenons le dessin du «ficus étrangleur» (voir page ci-contre), saisi dans la forêt de Pakitza, en Amazonie péruvienne, par Francis Hallé. L'expression s'applique à plusieurs espèces du genre *Ficus* (les figuiers), de la famille des moracées, cousines des *Ficus benjamina* de nos salons. Dans la course à la lumière qui sévit dans les denses forêts tropicales, ces arbres ont adopté une stratégie étonnante.

Les graines sont transportées par les oiseaux et laissées en haut d'un arbre qui deviendra un support. Après la germination, des branches se développent vers le haut, tandis que des racines dites aériennes progressent vers le bas. Quand elles atteignent le sol, la croissance du figuier

s'accélère. Les racines se soudent, grossissent, jusqu'à former un treillis suffisamment épais pour assurer l'autoportance du ficus. Le carcan qui enserrera alors l'arbre-support l'empêche de croître en diamètre et le tue (les supports qui ne s'élargissent pas, comme les palmiers, survivent). Changé en humus, l'arbre-support nourrit ensuite le figuier qui l'a fait mourir...

Dans les forêts tropicales, les figuiers étrangleurs sont des espèces clés dont dépendent d'autres espèces, notamment les guêpes de la famille des *Agaonidae*. Plus encore, en Inde, le figuier étrangleur *Ficus religiosa*, aussi nommé figuier des pagodes, est un symbole d'éternité. Celui du village de Bodh-Gaya, dans l'État du Bihar, est même sacré, car c'est sous son feuillage que le bouddha aurait atteint la *bodhi*, c'est-à-dire l'éveil. Sans même être inquiété par les racines aériennes de l'arbre qui ont dédaigné son cou.

Parmi les dessins de Francis Hallé présentés à la Fondation Cartier, on découvrira d'autres arbres spectaculaires: les timides qui n'osent pas se toucher entre eux (comme certains eucalyptus d'Australie, des camphriers du Japon...), des palmiers qui collectent les feuilles mortes pour élaborer leur propre humus (sans faire de victime cette fois), le moabi du Gabon, des agroforêts du Sri Lanka...

Les œuvres du botaniste résonnent avec celles, également exposées, des communautés indigènes vivant au cœur des forêts tropicales (Nivaclés, Guaranis, Yanomamis...), qui confirment son intuition: «Je me demande si le rapport premier aux arbres n'est pas d'abord esthétique avant même d'être scientifique?» ■

«Nous les Arbres»,
jusqu'au 10 novembre 2019 à la Fondation Cartier
pour l'art contemporain, à Paris.
<http://bit.ly/FC-Arbres>

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

COUP DE CHALEUR SUR LE CAOUTCHOUC

Remarquablement élastiques, le caoutchouc et les autres élastomères s'échauffent quand on les étire. Des propriétés que l'on explique bien en tenant compte du nombre de conformations possibles de leurs longues chaînes moléculaires.

Le savant anglais John Gough l'avait remarqué dès 1802 : lorsqu'on chauffe du caoutchouc tendu, il se contracte au lieu de se dilater ! Une variante de cette expérience est facile à réaliser. Elle consiste à étirer fortement et rapidement un ballon de baudruche depuis son état détendu ; comme l'attestent une caméra thermique ou le simple contact de l'objet avec les lèvres, le matériau ainsi allongé s'échauffe de plusieurs degrés (voir l'illustration ci-contre). Inversement, on obtient un refroidissement du même ordre lorsqu'on relâche complètement le caoutchouc après l'avoir maintenu étiré.

Comment expliquer ces propriétés inattendues ? Il a fallu attendre les années 1930 pour commencer à comprendre leur origine microscopique.

Le caoutchouc et les autres matériaux élastomères sont constitués de chaînes

moléculaires longues et flexibles. Par exemple, les chaînes du caoutchouc naturel résultent de la polymérisation de milliers d'unités d'isoprène, une molécule organique à squelette linéaire formé de quatre atomes de carbone.

UNE LONGUE CHAÎNE QUI SE TORTILLE

Chaque chaîne est très flexible, les liaisons successives carbone-carbone pivotant aisément l'une par rapport à l'autre. Deux segments séparés par quelques liaisons peuvent donc avoir des orientations très différentes. De plus, à part l'impossibilité pour les atomes de s'interpénétrer, les différents maillons de la chaîne n'interagissent quasiment pas.

Toutes les conformations possibles de la chaîne, qui diffèrent par les orientations de ses segments et la position de ses extrémités, ont ainsi la même énergie. Par conséquent, lorsque la chaîne polymère

Quand on étire un ballon de baudruche, sa température augmente. Dans cette expérience filmée avec une caméra thermique, la température est passée d'environ 23 °C à 36 °C.



est libre, toutes ces configurations ont la même probabilité de se réaliser.

Ces caractéristiques sont communes à la vaste famille des élastomères. On peut mettre en évidence leur lien avec les propriétés élastiques de ces matériaux en effectuant des expériences sur une chaîne unique plongée dans un solvant.

Que constate-t-on ? Si l'on fixe l'une des deux extrémités de la chaîne, celle-ci

Les auteurs ont récemment publié :
En avant la physique !,
une sélection de leurs chroniques (Belin, 2017).

