

de $2k$ bosses et de $(2k+1)$ creux (une telle forme se dénomme k -hexapilier) a permis de battre le record de Robert Ammann : Casey Mann a prouvé que le nombre de Heesch des 2 et 3-hexapiliers est 4 et que le nombre de Heesch des k -hexapiliers où $k > 3$ est égal à 5 (voir l'encadré page ci-contre, c).

Casey Mann poursuit son étude systématique en cherchant à dénombrer les poly-formes en fonction de leur nombre de Heesch. Le projet est difficile car, même pour un petit nombre de côtés, les combinaisons possibles pour placer les creux et les bosses sont extrêmement nombreuses. Des milliers d'heures de calculs ont déjà été utilisées pour les décomptes.

Pour tout nombre de Heesch, des pavés ?

Pour l'instant, le record de 5 n'a pas été battu, mais selon Casey Mann, cela sera probablement le cas. Il pense en effet que, pour tout n , on trouvera des pavés ayant un nombre de Heesch supérieur à n . Cette conjecture affirmant l'existence de pavés dotés d'un nombre de Heesch aussi grand qu'on le veut est parmi les plus difficiles de la géométrie des pavages. Elle est liée à un autre problème important de la théorie des pavages, lui aussi non résolu.

Ce problème consiste à se demander si un pavé donné (qu'on prendra polygonal pour simplifier) pave le plan, et à rechercher un algorithme qui, à chaque fois qu'on lui soumettrait un tel pavé, calculerait (sans se tromper, bien sûr) la réponse, *oui* ou *non*. Dans le cas de plusieurs pavés (on se donne une famille finie de pavés polygonaux et on cherche à déterminer s'ils pavent le plan) la réponse est connue : il n'existe aucun algorithme réalisant ce travail. Cette « indécidabilité du problème du pavage » pour plusieurs pavés a été démontrée en 1966 par l'Américain Robert Berger.

Pour un seul pavé, la réponse est inconnue : on ignore s'il existe un algorithme infallible indiquant si un pavé polygonal pave ou non le plan.

Cependant, on montre que si le problème du pavage pour un pavé polygonal est indécidable, alors il n'existera pas de borne finie

pour le nombre de Heesch. Résoudre la conjecture concernant la décidabilité algorithmique du pavage par un polygone résoudrait donc la conjecture concernant le nombre de Heesch.

De nombreuses variantes du problème de Heesch ont été étudiées et parfois entièrement résolues.

Sur la sphère, peu de résultats sont connus. Le plus avancé est donné par un pavé, un triangle équilatéral d'angle 75° , dont le nombre de Heesch est 3. Dans les espaces euclidiens de dimension 3 ou plus, on sait limiter le nombre de Heesch (on place des bosses et des creux), mais pour l'instant, on n'a pas trouvé de formes ayant un nombre de Heesch supérieur à 5.

Si, au lieu de se placer sur le plan euclidien, on se place sur le plan hyperbolique, Alexey Tarasov de l'Académie des sciences de Russie a prouvé en 2010 que le nombre de Heesch d'un pavé peut être fini et aussi grand qu'on le veut. Il est assez étrange que le problème de Heesch soit plus facile sur le plan hyperbolique que sur le plan euclidien !

Pourquoi certains problèmes à l'énoncé simple, que tout le monde comprend, sont-ils aussi ardues ? Pourquoi nos puissantes machines explorant des millions de combinaisons par seconde échouent-elles à nous éclairer plus rapidement ? C'est l'un des mystères les plus profonds des mathématiques ; mais c'est aussi ce qui fait leur intérêt et leur charme : à chaque pas, même quand on se croit en terrain conquis, un obstacle inopiné surgit devant nous, exigeant des jours, des mois, des années ou des siècles de travail.

L'AUTEUR



J.-P. DELAHAYE est professeur émérite à l'Université de Lille et chercheur

au Centre de recherche en informatique, signal et automatique de Lille (CRISTAL).

BIBLIOGRAPHIE

C. Mann et B. Thomas, **Heesch number of edge-marked polyform**, à paraître, 2015.

A. Akhmedov, **Cayley graphs with an infinite Heesch number**, prépublication arXiv:1412.0358, 2014.

A. Tarasov, **On the Heesch number for the hyperbolic plane**, *Mathematical Notes*, vol. 88(1-2), pp. 97-102, 2010.

C. Mann, **Heesch's tiling problem**, *American Mathematical Monthly*, vol. 111(6), pp. 509-517, 2004.

Références supplémentaires sur le site www.pourlascience.fr



Retrouvez la rubrique Logique & calcul sur www.pourlascience.fr

DES NOUVELLES DES GRAPHS-ALLUMETTES

L'article sur les graphes-allumettes (*Pour la Science*, novembre 2014) a inspiré un lecteur qui a étendu le catalogue connu de ces graphes particuliers et délicats à classer. Le résultat du colossal travail d'Alexis Vaisse se trouve sur :

<http://alexis.vaisse.monsite-orange.fr/page-54b81c6bc01a2.html>

Dans les dénombrements qu'il a réalisés, Alexis Vaisse trouve 2008 graphes-allumettes à 10 arcs, qui s'organisent en 33 catégories. Pour ceux qui souhaiteraient vérifier le travail, le prolonger ou l'utiliser, diverses données et programmes concernant ces graphes sont disponibles sur la page web indiquée. Alexis Vaisse a entrepris de poursuivre le catalogue en traitant les graphes-allumettes à 11, 12 ou 13 arcs.

SCIENCE & FICTION

Quand les morts sortent de terre

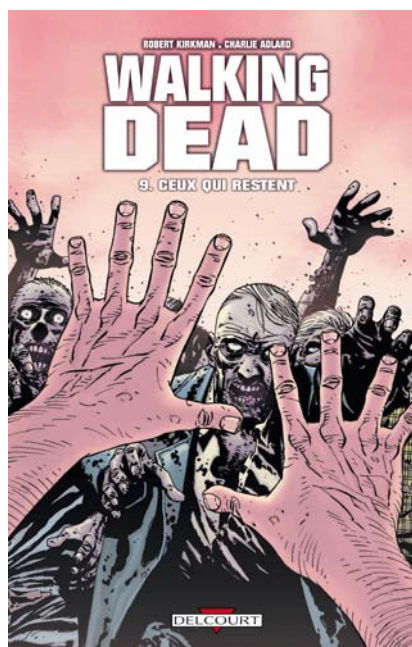
Les zombies, morts qui reviennent à la vie, c'est du cinéma ! Mais les fossiles, à partir desquels on reconstitue les espèces disparues et leur environnement, ne sont-ils pas les zombies de la paléontologie ?

Jean-Sébastien STEYER et Roland LEHOUCQ

En 1968, le cinéaste George Romero réalise *La Nuit des morts-vivants*, film d'horreur à petit budget en noir et blanc : des cadavres sortent de terre dans un cimetière de Pennsylvanie et sèment la terreur parmi les humains qu'ils tentent de dévorer ! L'engouement du public et le succès du film sont tels que le réalisateur, créant un genre à part entière, entreprend alors cinq suites dont *Zombie* (1978), critique de la société de consommation où les morts-vivants envahissent, cette fois, un centre commercial. Aujourd'hui, les zombies sont partout : grand écran, jeux vidéo, bandes dessinées, séries télé et romans.

Le terme proviendrait du créole haïtien *zombi* qui désigne, dans la culture vaudou, une personne en état de transe, souvent violente et capable d'entrer en communication avec les morts. Lent ou rapide, passif ou affamé, le zombie, quel que soit son état de décomposition, demeure avant tout un humain, victime d'une maladie dégénérative souvent transmissible, qui finit par ressusciter.

Ainsi, le phénomène de « zombification » touche avant tout *Homo sapiens*. Certains cinéastes inventifs ont cependant appliqué le genre zombie aux animaux, créant ainsi une véritable « nécrodiversité ». Par exemple, dans *Re-Animator* (Stuart Gordon, 1985) — librement inspiré d'une nouvelle de Howard Phillips Lovecraft —, des médecins déjantés inventent un sérum capable de ressusciter



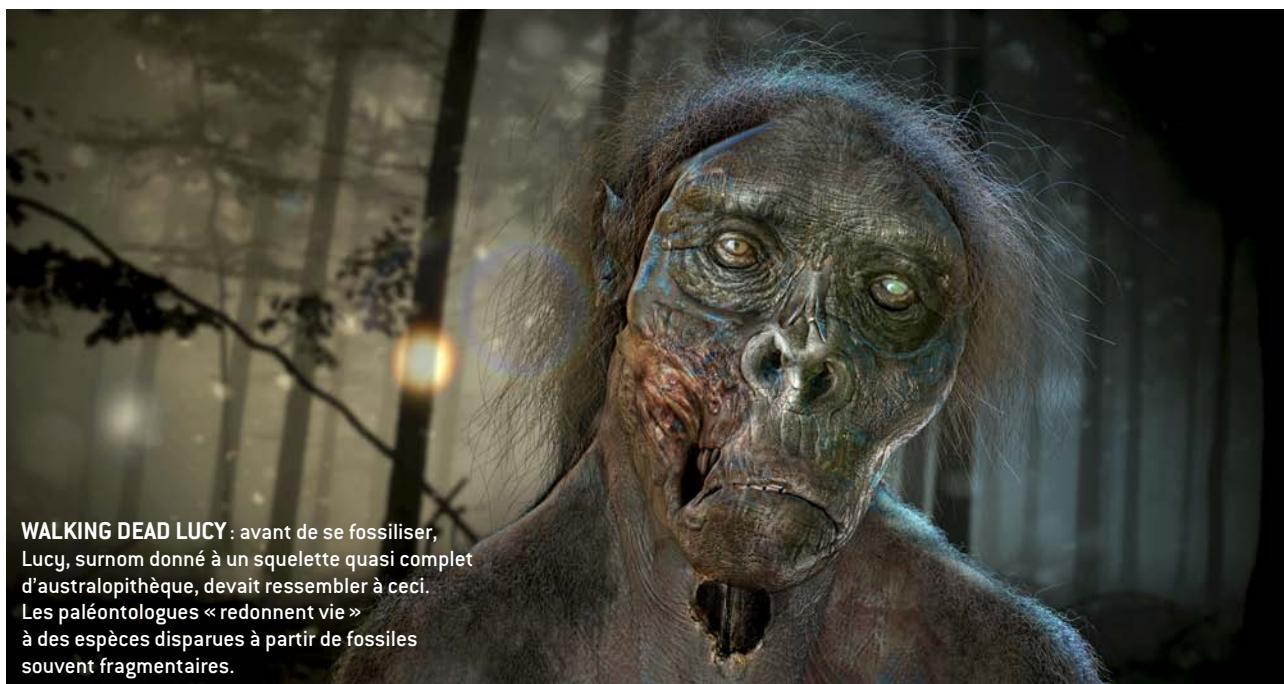
DANS THE WALKING DEAD, une bande dessinée adaptée en série télévisée, les héros tentent de survivre dans un monde envahi par les zombies.

les morts. Ils le testent d'abord sur un chat écrasé avant de s'occuper des cadavres de la morgue. Dans *Braindead* (Peter Jackson, 1992), un zombie mi-singe mi-rat mord la mère du jeune héros, qui se transforme alors en monstre et contamine d'autres personnes. Citons également les dobermans zombies dans le jeu vidéo et le film *Resident Evil*, les moutons zombies dans le loufoque *Black Sheep* (Jonathan King, 2006) ou, pire encore, les castors zombies qui s'attaquent à un groupe d'étudiantes dans *Zombeavers* (Jordan Rubin, 2014)...

Cette nécrodiversité, aussi fantasque soit-elle, n'est pas sans rappeler ce que les paléontologues nomment très sérieusement une thanatocénose (du grec *thantos*, la mort, et *cénose*, la population), notion majeure dans la compréhension de l'évolution de la vie sur Terre.

Pour reconstituer les « mondes disparus », les paléontologues ne disposent que de fossiles, c'est-à-dire de restes d'organismes qui se sont pétrifiés avec le temps. Les spécialistes parlent de perminéralisation : dans le sol, de l'eau riche en minéraux a comblé les espaces vides dans l'organisme mort, les minéraux ont précipité et ont ainsi préservé de nombreux détails morphologiques.

Avant leur fossilisation, les organismes sont, tout comme les zombies des films d'horreur, dans un état plus ou moins avancé de décomposition. Lorsqu'on les découvre enfouis dans les strates géologiques, ces



WALKING DEAD LUCY : avant de se fossiliser, Lucy, surnom donné à un squelette quasi complet d'australopithèque, devait ressembler à ceci. Les paléontologues « redonnent vie » à des espèces disparues à partir de fossiles souvent fragmentaires.

restes constituent alors ce que l'on nomme un assemblage fossile, très utile pour comprendre l'environnement de l'époque et les conditions de fossilisation.

Un assemblage fossile englobe souvent des restes de formes, de tailles et de natures variées, conservés dans la même couche sédimentaire : grains de pollen, débris végétaux, fragments de coquilles, dents isolées, esquilles osseuses ou squelettes complets sont autant de vestiges d'espèces ayant alors vécu à la même époque. Même si beaucoup d'organismes du site étudié n'ont pas fossilisé, l'assemblage fossile donne aux paléontologues une idée de la thanatocénose, c'est-à-dire de la population d'organismes morts : une étape décisive pour reconstruire ensuite la paléobiocénose, autrement dit, la population totale des organismes vivants à l'époque.

Afin de reconstruire la totalité de la biocénose à partir de la thanatocénose, les paléontologues font appel à une discipline à part entière, la taphonomie (du grec *taphos*, l'enfouissement). Cette science vise à reconstruire l'histoire de chaque spécimen, de sa mort jusqu'à la découverte de son fossile : a-t-il été transporté, par un cours d'eau par exemple, avant de se fossiliser ? S'est-il déposé à l'endroit ou à l'envers dans le sédiment ? A-t-il été enseveli rapidement ou, au contraire, a-t-il subi l'action de charognards ou d'autres nécrophages ? Toutes les parties de son squelette sont-elles fossilisées ? Enfin, quelles

transformations chimiques se sont opérées lors de sa fossilisation ? Autant de questions qu'un « expert » de la série télévisée éponyme se pose afin de reconstituer une scène de crime.

Le paléontologue, expert des morts fossilisés

Pour étudier un fossile, le paléontologue dispose de divers outils et méthodes. Une analyse est souvent effectuée au microscope électronique à balayage. Elle met en évidence de nombreuses traces invisibles à l'œil nu, telles que des micro-usures (sur les dents, elles indiquent le type de nourriture ingéré), des marques de corrosion (si l'organisme en question est passé dans un tube digestif avant d'être fossilisé), de prédation ou encore de perforation (certains vers nécrophages, que l'on voit parfois dans les films gores, perforent les os des cadavres).

La plupart des raisonnements du paléontologue reposent sur le principe d'actualisme – aussi nommé uniformitarisme – qui stipule que les phénomènes se déroulant de nos jours n'ont aucune raison de ne pas avoir existé dans le lointain passé de la Terre. Ainsi, il y a toujours eu des herbivores mangés par des prédateurs, des reliefs érodés par les pluies, ou encore des cours d'eau charriant des cadavres. L'observation de phénomènes actuels peut donc renseigner sur la formation de fossiles, même si ce processus est parfois très long. Tel

est l'objectif de la taphonomie expérimentale qui, en plaçant par exemple des carcasses de crevettes dans une solution saturée en phosphore, tente de mieux comprendre la formation de crustacés fossiles dans des sédiments riches en phosphates. Enfin, la géochimie se révèle tout aussi utile en étudiant les réactions chimiques qui ont lieu lors de la transformation des sédiments en roches ou de restes organiques en fossiles.

Avec l'analyse de la thanatocénose d'un gisement de fossiles, la taphonomie complète la reconstitution d'un environnement aujourd'hui disparu. Parfois, cette reconstitution demande aussi un peu d'imagination : ce n'est peut-être pas pour rien que la taphonomie a été créée par le paléontologue explorateur russe Ivan Efremov (1907-1972), spécialiste des stégocéphales (ou amphibiens anciens) et auteur de science-fiction. L'utopie cosmique *La Nébuleuse d'Andromède* (1957), son œuvre la plus connue, lui a même valu le titre de « père de la science-fiction soviétique ».

Il est clair que l'imagination sert la fiction, mais elle sert aussi la science, surtout lorsque celle-ci est historique. Le rêve des paléontologues, ces nécromanciens du passé, n'est-il pas finalement de ramener les morts à la vie ? ■

J.-S. STEYER est paléontologue au CNRS-MNHN, à Paris. R. LEHOUCQ est astrophysicien au CEA, à Saclay.