

ensembles ne concernent que des problèmes alambiqués et si complexes qu'aucun mathématicien ne s'y intéressera jamais de lui-même : s'interroger sur $s(1\,919)$ est naturel, car cela concerne la partie la plus élémentaire de la théorie mathématique du calcul...

Notons que ce record $n_0 = 1\,919$ est sans doute améliorable, car, comme le savent bien ceux qui tentent de connaître les valeurs de $s(n)$, les difficultés concrètes commencent dès $s(5)$, qui reste inconnu à ce jour. Une bonne marge de travail est donc disponible entre 5 et 1 919, marge que l'on réduira soit en progressant dans le calcul des $s(n)$, soit en réussissant à prouver l'indécidabilité d'énoncés de la forme $s(n) = k$ pour des valeurs encore plus petites que $n_0 = 1\,919$.

La machine Z ne s'arrête jamais

La méthode utilisée par Adam Yedidia et Scott Aaronson est intéressante. L'idée la plus naturelle serait de mettre en œuvre les techniques d'arithmétisation de la syntaxe de Gödel et donc de construire une machine de Turing M qui recherche une contradiction dans ZFC en énumérant toutes les démonstrations de ZFC et en tentant d'y reconnaître une preuve de l'énoncé « $0 = 1$ ». Une telle machine ne trouvera pas de contradiction, et pourtant ZFC ne pourra pas le démontrer (sinon, cela signifierait que ZFC démontre qu'elle n'est pas contradictoire, ce que le second théorème d'incomplétude de Gödel interdit). Cependant, cette méthode par l'arithmétisation de la syntaxe conduirait à une machine de Turing à plusieurs centaines de milliers d'états, voire des millions, et l'on ne démontrerait donc l'indécidabilité de $s(n) = k$ que pour un n très grand.

La méthode utilisée par Scott Aaronson et Adam Yedidia évite cette explosion du nombre d'états de la machine de Turing dont ZFC ne peut prouver le non-arrêt. Elle se fonde sur des travaux récents de Harvey Friedman, de l'université d'État de l'Ohio, qui élabore depuis des années des énoncés d'arithmétiques indécidables dans ZFC ou d'autres théories. L'un d'eux concerne une propriété des graphes et cette propriété, trop abstraite pour être décrite ici, est équivalente à celle

exprimant la non-contradiction de ZFC. Cette propriété s'écrit assez facilement en termes arithmétiques et la machine, notée Z , qui cherche un contre-exemple à cet énoncé est donc relativement simple comparée à celle qu'on aurait obtenue par arithmétisation de la syntaxe : elle énumère des séries d'entiers et effectue des tests sur eux. Le fait que Z ne s'arrête pas dans cette recherche de contre-exemple est nécessairement un indécidable de ZFC, sinon, encore une fois, ZFC démontrerait d'elle-même qu'elle est non contradictoire.

Soit n_0 le nombre d'états de Z . Puisque pour connaître $s(n_0)$, ZFC doit savoir prouver le non-arrêt de chaque machine à n_0 états qui ne s'arrête pas, il en résulte que ZFC ne peut pas démontrer $s(n_0) = k$ pour la bonne valeur k . Précisons que la propriété en question des graphes est démontrable dans une théorie un peu plus forte que ZFC, et donc qu'on a toutes les raisons de la croire vraie. Notons aussi qu'une fois leur machine Z programmée, Scott Aaronson et Adam Yedidia l'ont effectivement lancée pour voir si elle s'arrêtait ; au bout de plusieurs heures, elle ne s'était pas arrêtée.

Sans effort particulier, utiliser ce raccourci déduit des travaux de Friedman n'aurait cependant pas permis à lui seul d'arriver aux petites valeurs de n_0 aujourd'hui connues. Scott Aaronson et Adam Yedidia ont, et c'est la seconde idée originale de leur travail, conçu un langage informatique nommé Laconic permettant d'exprimer la propriété de Friedman de manière concise. Ils ont aussi écrit et utilisé le traducteur des programmes écrit en Laconic qui en tire des machines de Turing du type considéré par Radó. C'est ainsi qu'ils ont obtenu la machine de Turing Z à 7 918 états qui ne s'arrête jamais, mais dont ZFC ne peut pas démontrer qu'elle ne s'arrête jamais. Le passage de 7 918 états à 1 919 états s'est fait en améliorant le langage et les opérations de transformation des programmes en machines de Turing.

Saura-t-on faire encore mieux et trouver des valeurs encore plus petites que le $n_0 = 1\,919$ d'aujourd'hui ? C'est probable, et peut-être qu'à l'heure où vous lirez ce texte, le record sera déjà battu. Pour le savoir, consultez le blog de Scott Aaronson !

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

S. Aaronson, *The 8000th Busy Beaver number eludes ZF set theory: New paper by Adam Yedidia and me*, blog de mai 2016, www.scottaaronson.com/blog/?m=201605

H. Marxen, *List of the known Busy Beaver values*, 2016, www.drb.insel.de/ftheiner/BB/

P. Michel, *The Busy Beaver competition: A historical survey*, 2016, <http://export.arxiv.org/pdf/0906.3749v4>

A. Yedidia et S. Aaronson, *A relatively small Turing machine whose behavior is independent of set theory*, 2016, <https://arxiv.org/pdf/1605.04343.pdf>

F. Soler-Toscano *et al.*, *Calculating Kolmogorov complexity from the output frequency distributions of small Turing machines*, *PLoS One*, vol. 9(5), e96223, 2014.

C. S. Calude et E. Calude, *Evaluating the complexity of mathematical problems: Part 1 & Part 2*, *Complex Systems*, vol. 18, pp. 267-285, 2009 et pp. 387-401, 2010.



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

SCIENCE & FICTION

Les parasites sont partout !

Ces organismes vivent aux dépens des autres. Souvent cachés, ils inspirent le dégoût ou la peur... les ingrédients parfaits pour des fictions horribles.

Jean-Sébastien STEYER et Roland LEHOUCQ

Illustration : Marc BOULAY

Les parasites prolifèrent dans tous les écosystèmes de la Terre, mais demeurent souvent invisibles à l'œil nu. Personne n'est à l'abri de ces organismes qui prospèrent aux dépens des autres. Ainsi, ils puisent leurs ressources et leur énergie directement chez l'hôte qui les héberge ou qui leur sert de vecteur pour atteindre une nouvelle cible. Certains coévoluent avec leur hôte depuis des millions d'années. Les parasites ont ainsi développé des cycles de reproduction complexes et arborent des formes repoussantes munies de tentacules, ventouses ou redoutables crochets.

Avec ces attributs peu avenants et les maladies qu'ils provoquent, les parasites ont inspiré de nombreux auteurs de fictions horribles ! En outre, dans certains cas, le parasite peut même tuer son hôte, histoire d'achever son cycle de développement : il devient alors parasitoïde. Il n'est donc pas rare de croiser dans diverses œuvres des êtres parasites ou parasitoïdes très peu fréquentables.

Le plus célèbre d'entre eux est sans doute le monstre Alien, fruit de l'imagination débridée du plasticien suisse Hans Ruedi Giger (décédé en 2014), et dont les premiers stades de développement sont parasitoïdes. Un défi est de discerner chez Alien, ou chez les autres parasites de fiction, les caractères et autres attributs plausibles tant les parasites réels ont développé des morphologies et des stratégies de survie originales.



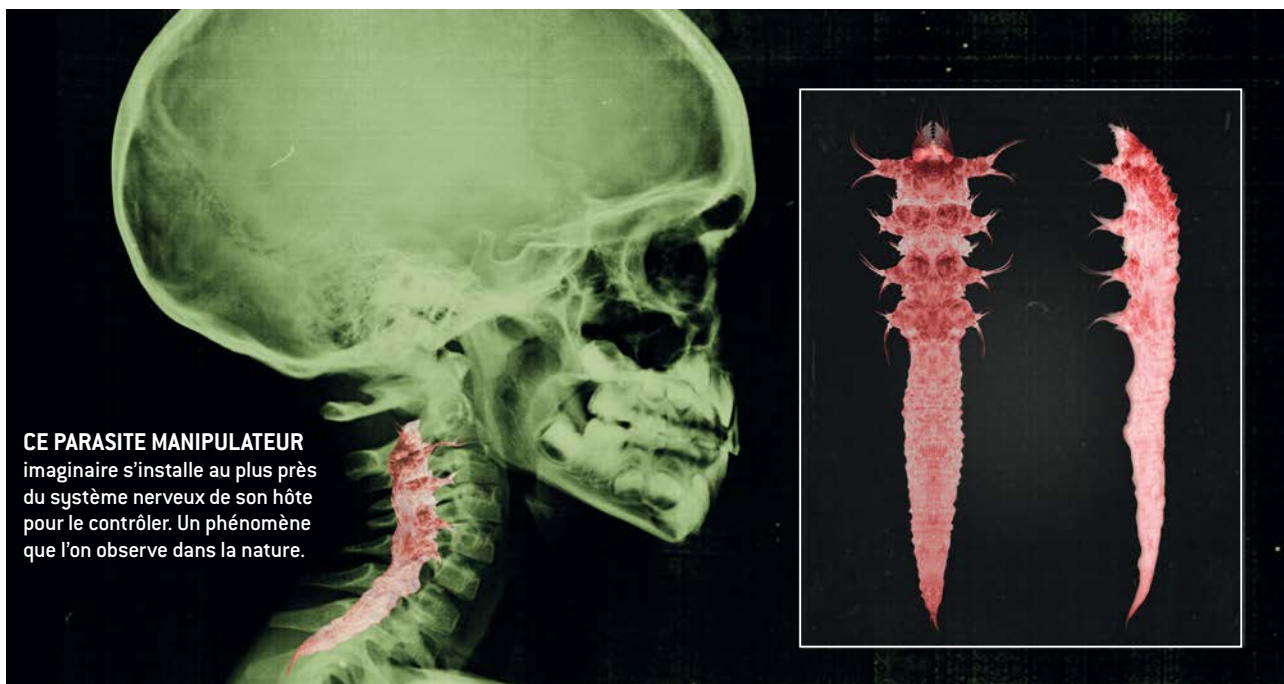
DANS LE SOMMEIL DU MONSTRE, bande dessinée d'Enki Bilal, le docteur Optus Warhole est une sorte de parasite manipulateur qui contrôle l'esprit de ses victimes.

Les milieux qu'ils colonisent sont un bon exemple. Peu d'endroits du corps leur échappent : la peau, les plumes, les poils (ectoparasites), le cerveau, le sang ou encore le tube digestif (endoparasites).

Dans le film *Pacific Rim* (Guillermo del Toro, 2013), les humains construisent des robots géants (les fameux « mechas ») pour lutter contre des envahisseurs titanesques issus d'un univers parallèle. Ces monstres géants (ou « kaijus », c'est-à-dire « étranges bêtes » en japonais) présentent des morphologies discutables (avec une surenchère de caractères anatomiques agressifs – cornes, dards, griffes, pinces, mandibules, etc.), mais une biodiversité intéressante. En témoigne par exemple Otachi, énorme kaiju évoquant un ptérosaure et présentant des parasites externes !

Ces sortes de gros arthropodes accrochés à la peau du monstre ne sont pas sans rappeler les cyamidés ou « poux des baleines », des crustacés marins bien réels qui squattent le cuir des gros cétacés actuels. Dans *Pacific Rim*, ces ectoparasites demeurent cependant inoffensifs, contrairement à leurs hôtes. Ce n'est pas le cas des parasites du monstre géant de *Cloverfield* (Matt Reeves, 2008) qui, eux, sont très agressifs et évoquent plutôt d'énormes amblypyges (arachnides à longues pattes munies de pinces).

Autres ectoparasites intéressants, les puces savantes de *La Cité des Enfants Perdus*, film esthétique et steampunk de Jean-Pierre Jeunet et Marc Caro (1995).



CE PARASITE MANIPULATEUR
imaginaire s'installe au plus près
du système nerveux de son hôte
pour le contrôler. Un phénomène
que l'on observe dans la nature.

Dans une ville portuaire lugubre, des enfants sont kidnappés pour tenter de soigner l'affreux Krank, qui ne peut plus rêver. Pour suivis par les méchants, les deux héros, une petite fille nommée Miette et son ami One, sont sauvés grâce à des puces munies de chélicères (ou crochets) artificiels et remplis d'une substance chimique qui transforme l'hôte en monstre sanguinaire.

Si ces parasites ont été réalisés en 3D (une prouesse technique pour l'époque), dans la nature, il existe près de 2 500 espèces de ces minuscules insectes hématophages regroupés sous le terme de siphonaptères, du latin *sipho*, tube, en référence à leur trompe rigide (ou stylet) qui leur permet de se nourrir. Les siphonaptères parasitent aujourd'hui de nombreux mammifères et quelques oiseaux, mais ils ont une origine très ancienne : une puce fossile datée du Jurassique (environ 165 millions d'années) et nommée pour cause *Pseudopulex jurassicus* a été découverte en Mongolie intérieure et aurait piqué des dinosaures à plumes et des ptérosaures !

Dans *La Cité des Enfants Perdus*, le fait que les puces savantes de Marcello, avant de toucher leur cible, soient véhiculées sur le dos de son dogue suggère qu'elles sont plutôt inféodées aux chiens et qu'elles appartiennent peut-être à l'espèce *Ctenocephalides canis*. Cette puce européenne parasite les canidés mais transmet aussi le ténia, ver solitaire qui s'installe dans l'intestin de son hôte pour s'y nourrir : un parasite peut donc en cacher un autre !

Le parasite ne se contente pas toujours de se nourrir grâce à son hôte. Il modifie parfois le développement, voire le comportement, de celui qui l'héberge : c'est le cas de la sacculine (*Sacculina carcini*), petit crustacé qui s'attaque à un autre crustacé, le crabe. Ce parasite est d'apparence très simple : adulte, il ressemble à un petit sac qui se fixe sur l'abdomen de son hôte. Seule sa larve, plus complexe, atteste de son appartenance au groupe des crustacés.

Il contrôle votre esprit

Le « sac » de la sacculine n'est que la partie émergée de l'iceberg, car il contient uniquement le système nerveux central et les organes sexuels de l'organisme. Le reste se développe à l'intérieur de l'hôte, sous la forme de diverticules évoquant des racines ou des rhizomes (d'où le terme de rhizocéphale pour regrouper les espèces du genre) et pouvant même envahir la totalité du corps de la victime ! Ce charmant parasite à la fois interne et externe pompe les nutriments de son hôte. Il modifie aussi profondément sa croissance en bloquant ses mues, et le castre – l'hôte ne se reproduit plus !

Ce terrible cas de parasitisme dit manipulateur (bien que ce comportement ne soit pas voulu par le parasite lui-même, il est le fruit de la sélection naturelle) a-t-il inspiré le dessinateur français Enki Bilal qui met en scène, dans sa bande dessinée

Le Sommeil du monstre (1998), le terrible docteur Optus Warhole ? Cet être polymorphe et démoniaque (il s'autoproclame d'ailleurs « incarnation du mal suprême ») parasite en effet le corps et l'esprit des personnages.

Dans certains cas, le parasite manipulateur pousse son hôte au suicide et à se faire manger par un prédateur afin d'atteindre un nouveau stade de son cycle de développement. C'est le cas de la douve du foie qui conduit son hôte, une fourmi, au sommet d'un brin d'herbe pour y être croquée par un ruminant.

Mais les parasites de la fiction ne s'attaquent pas qu'aux organismes vivants : ils peuvent s'en prendre aussi aux vaisseaux spatiaux ! Dans *Star Wars : Épisode V, L'Empire contre-attaque* (George Lucas, 1980), d'étranges parasites volants à tête en forme de ventouse, les Mynocks, parasitent le Faucon Millenium, le vaisseau de Han Solo. Ces créatures semblent autotrophes, c'est-à-dire qu'elles se nourrissent de matière inorganique, minérale ou métallique selon l'hôte.

Sur Terre, pratiquement tous les grands groupes vivants, protozoaires, bactéries, vers, arthropodes et autres, ont présenté des cas de parasitisme. De quoi inspirer encore de nombreuses œuvres de science-fiction ! ■

Jean-Sébastien STEYER est paléontologue au CNRS-MNHN, à Paris. Roland LEHOUCQ est astrophysicien au CEA, à Saclay. Marc BOULAY est sculpteur numérique.

ART & SCIENCE

Tous les Chinois disent I love Yu

La découverte des traces géologiques d'un déluge cataclysmique en Chine il y a quatre mille ans donne du crédit à un mythe du pays : celui du roi Yu le Grand, dompteur des flots et fondateur des Xia, la première dynastie chinoise.

Loïc MANGIN

Il était une fois un mythe. Nous sommes en Chine, il y a plus de quatre mille ans, et la légende raconte que Yu, le premier roi de la première dynastie, celle des Xia, est monté sur le trône après avoir dompté les flots qui ont submergé les terres pendant deux générations. Ce déluge est connu chez les Chinois sous le nom de Crue des Hautes Eaux. Pour son exploit, Yu fut divinisé et devint, dans le panthéon taoïste, le dieu régisseur des eaux. Ainsi porté au rang de figure tutélaire, le roi Yu, dit le Grand, a fait l'objet de nombreuses œuvres d'art, poèmes et gravures, dont celle que Totoya Hokkei a réalisée au XIX^e siècle, pendant l'époque Edo (voir page ci-contre). On y voit le monarque légendaire affronter les flots tumultueux symbolisés sous la forme d'un dragon.

Les inondations auraient commencé sous le règne de l'empereur Yao. Lequel donna l'ordre à Gun, le père de Yu, d'y remédier. Hélas, la méthode qu'il choisit, à savoir l'érection de digues et de barrages, échoua. Même l'emploi de Xirang, un matériau magique qui a la réputation de se dilater à volonté et qu'il déroba aux dieux, ne put rien contre la rage des eaux. On déplora encore de nombreuses victimes, notamment Gun lui-même que Shun, le successeur de Yao, condamna. Le salut vint de Yu.

Lui préféra faire creuser de très nombreux canaux, des travaux gigantesques qui ont duré plusieurs années, de façon à diriger les flots et épargner habitations et

populations. On raconte que Hebo, le dieu du fleuve Jaune, aida Yu en lui fournissant une carte de la rivière et de ses environs.

Ce fut un tel succès que Shun préféra Yu à son fils pour lui succéder ! Ainsi s'installa la dynastie Xia (pour quelque cinq siècles), car Yu instaura le principe de la transmission héréditaire du pouvoir. Ce mythe s'interprète également comme celui de la transition de la

Le fleuve serait resté bloqué six à neuf mois, le temps qu'environ 12 à 17 kilomètres cubes d'eau s'accumulent derrière le barrage

civilisation chinoise vers une société agricole grâce à la maîtrise de l'eau.

Quelle est la part de vérité dans ce mythe ? Yu a-t-il réellement existé ? Les historiens en débattent depuis longtemps. Aucune mention du roi vainqueur des eaux n'a été retrouvée dans les vestiges archéologiques datant de l'époque où il est censé avoir vécu (de 2200 à 2101 avant notre ère). La première mention de son nom date de la période des Zhou de l'Ouest, plus de mille ans après son supposé règne.

La situation a évolué avec les récentes découvertes de Qinglong Wu, de l'université de Pékin, et ses collègues. Leurs trouvailles donnent du crédit à l'idée d'un déluge il y a près de quatre mille ans. Ces chercheurs ont cartographié des sédiments lacustres et ont daté ces derniers ainsi que les restes

de trois humains ensevelis. Les résultats révèlent qu'un glissement de terrain dû à un séisme en 1920 avant notre ère a endigué le fleuve Jaune dans les gorges Jishi, situées sur le bord du plateau tibétain, dans ce qui est aujourd'hui la province du Qinghai. Le cours serait resté bloqué six à neuf mois, le temps qu'environ 12 à 17 kilomètres cubes d'eau s'accumulent derrière le barrage inopiné. Et ce dernier céda... entraînant l'inondation de la grande plaine du nord de la Chine, le berceau de la civilisation du pays. On imagine comment l'événement a pu frapper l'esprit des populations qui en ont été les témoins !

Les auteurs de l'étude ont remarqué que ce déluge est concomitant au changement de lit du fleuve, qui s'est frayé un nouveau cours. Par ailleurs, ce cataclysme coïncide avec une transition culturelle majeure, celle qui fit passer la Chine du néolithique à l'âge du Bronze. La culture Erlitou, qui marque ce passage pour les archéologues, correspond peut-être à la dynastie mythique Xia.

La Crue des Hautes Eaux rejoindrait ainsi la liste des déluges mythiques qui auraient un soubassement historique (c'est le cas de celui de la Bible). Et Yu ? On raconte que, quand la légende est plus belle que l'histoire, on publie la légende. Puisque cette fois les deux se rejoignent...

Q. Wu et al., Outburst flood at 1920 BCE supports historicity of China's Great Flood and the Xia dynasty, *Science*, vol. 353, pp. 579-582, 2016.