

quadrillage, est occupée par un microcalculateur qui ne fait qu'une seule chose extrêmement simple :

— Si, à l'instant t , il est dans l'état mort (représenté par la couleur blanche), alors le microcalculateur examine ses 8 voisins ; si 3 exactement sont vivants, il passe dans l'état vivant à l'instant $t + 1$; sinon, il reste dans l'état mort.

— Si, à l'instant t , il est dans l'état vivant (représenté par la couleur noire), alors le microcalculateur examine ses 8 voisins ; si 2 ou 3 sont dans l'état vivant, le calculateur reste dans l'état vivant à l'instant $t + 1$; sinon, il meurt. En résumé : « Naissance si 3 voisins vivants, survie si 2 ou 3 ».

Le pouvoir de calcul d'un tel réseau est bien supérieur à ce que l'on peut imaginer, et d'ailleurs John Conway a montré qu'on pouvait calculer avec cet automate cellulaire tout ce qui est calculable par algorithme. Pour cela, il faut placer au départ la bonne configuration et ne pas être pressé !

En 2010, Adam Goucher, prenant au sérieux le résultat théorique de John Conway, a conçu une configuration du jeu de la vie comportant 1 389 325 cases vivantes. En évoluant génération après génération, la configuration calcule les chiffres de π écrit en base 10 et, c'est le plus étonnant, va les écrire en diagonale à l'aide de cases vivantes déposées qui dessinent les chiffres en écriture habituelle.

L'exploit est inouï, mais, une fois encore, c'est un jeu : au bout de plusieurs heures de fonctionnement avec mon ordinateur, la configuration d'Adam Goucher a réussi à écrire 3,14159265. L'obtention d'autres décimales demanderait des jours ou des semaines. Le calcul utilise un produit infini et progresse en $O(n^6)$, ce qui veut dire que s'il faut k heures de calcul pour avoir n décimales, en avoir le double demandera $2^6 = 64$ fois plus de temps (et cela à la condition que la mémoire disponible sur l'ordinateur ne fasse pas défaut).

Pour terminer, signalons deux méthodes illusoires de calcul de π , parfois présentées comme sérieuses, mais qui en réalité ne vous donneront jamais rien.

La première pourrait être qualifiée de géographique. Dans un article publié dans

la revue *Science* en mars 1996, Hans-Henrik Stølum, de l'université de Cambridge, décrit un modèle d'écoulement des cours d'eau. Il tire de son modèle l'affirmation qu'en moyenne, le rapport entre la longueur d'un fleuve et la distance à vol d'oiseau entre la source et l'endroit où le fleuve se jette à la mer est le nombre π . En se fondant sur ce résultat, on pourrait donc tenter de calculer π en prenant un grand nombre de fleuves, et en calculant la moyenne des rapports entre leur longueur et la distance parcourue à vol d'oiseau entre la source et l'embouchure.

Malheureusement, tous ceux qui, à partir de bases de données géographiques, ont essayé arrivent à des valeurs sensiblement plus petites que π . Il semble bien que le modèle théorique soit inexact, et qu'en tout cas, pour calculer π , on ne tirera rien de la longueur des fleuves.

π n'est tout de même pas partout !

L'autre méthode illusoire est celle liée à la théorie économique de Martin Armstrong. Cet Américain est l'auteur d'une théorie (*Economic Confidence Model*) selon laquelle l'économie est soumise à des ondes cycliques tous les 8,6 ans et que les prendre en compte permet de prévoir les crises. La durée de 8,6 ans correspond à 3 141 jours, soit 1 000 π . On a du mal à comprendre ce que π , avec une précision de 4 chiffres, vient faire dans les cycles économiques, mais Martin Armstrong prétend avoir annoncé, grâce à sa théorie, la crise de 1987 au jour près.

Plus récemment, Martin Armstrong avait annoncé une nouvelle crise pour le 1^{er} octobre 2015. Elle ne s'est pas produite ! Tout cela ne semble pas très sérieux et, si les mathématiciens sont bien persuadés de l'importance et de l'ubiquité de π , ils n'ont pas la naïveté de croire en de telles théories dont, d'ailleurs, aucune justification n'est présentée. C'est un plaisir de jouer avec π et de le découvrir partout, mais c'est avant tout un amusement qu'il est sage de ne pas transformer en superstition numérologique.

■ 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

V. Dumoulin et F. Thouin, *A ballistic Monte Carlo approximation of π* , prépublication arXiv:1404.1499, 2014.

G. Galperin, *Playing pool with π (the number π from a billiard point of view)*, *Regular and Chaotic Dynamics*, vol. 8(4), pp. 375-394, 2003.

A. Klebanoff, *π in the Mandelbrot set*, *Fractals*, vol. 9(4), pp. 393-402, 2001.

H.-H. Stølum, *River meandering as a self-organization process*, *Science*, vol. 271, pp. 1710-1713, 1996.

■ SUR LE WEB

Dessin animé montrant les 31 chocs de deux billes dont le rapport des masses est 100, 2016 : <https://www.youtube.com/watch?v=4UhpTrHlprk>

Wikipédia, *Aiguille de Buffon*, consulté en 2016 : https://fr.wikipedia.org/wiki/Aiguille_de_Buffon



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

SCIENCE & FICTION

Tout l'Univers sur le dos

Conjuguant lenteur et longévité, dotées d'une étrange carapace, les tortues sont des animaux atypiques. Elles stimulent l'imagination et occupent une place centrale dans certaines mythologies.

Jean-Sébastien STEYER et Roland LEHOUCQ

Illustration : Marc BOULAY

La tortue est aux reptiles ce que le paresseux est aux mammifères. Bien avant les *Fables de La Fontaine* (1668), elle symbolisait la lenteur, mais aussi l'endurance et la perspicacité. Véritable animal-totem, la tortue est sacrée depuis l'Antiquité. Si, pour nous, elle semble porter péniblement sa maison sur son dos (sa carapace peut atteindre 70 % de sa masse corporelle totale), dans la cosmogonie chinoise la tortue supporte tout l'Univers. On observe une symbolique similaire dans la mythologie indienne, où le monde est porté par quatre éléphants géants, eux-mêmes soutenus par une énorme tortue terrestre. L'écrivain de *fantasy* humoristique Terry Pratchett (1948-2015) a d'ailleurs repris cette idée dans son *Disque-monde*, monde plat et circulaire porté par la Grande A'Tuin, tortue marine géante naviguant dans le cosmos (*ci-contre*) – et portant le nom très scientifique de *Chelys galactica* !

Dans la réalité, les tortues (ou testudines) constituent un groupe particulier de reptiles quadrupèdes et ovipares nommés chéloniens. Les spécialistes en ont recensé 332 espèces, terrestres ou aquatiques. Sur le plan anatomique, les chéloniens sont caractérisés notamment par un crâne fermé, sans fenêtre temporale, un bec coupant et une carapace plus ou moins ossifiée – elle demeure très souple par exemple chez *Malacochersus tornieri*, tortue terrestre capable de se glisser dans des petites anfractuosités ! Cette carapace se compose de deux éléments

principaux, le plastron sur le ventre et la dossière au-dessus. Elle forme une sorte d'abri à température plus ou moins constante constitué de plaques osseuses (nommées ostéodermes) issues des côtes, de cartilage et recouverte d'écailles en kératine ou d'un cuir (chez les tortues marines ou d'eau douce).

Avec le film *Les Tortues Ninja 2* (2016, Dave Green), les chéloniens reviennent en force sur nos écrans : ces héros préférés des adolescents étaient à l'origine des personnages loufoques de bande dessinée, imaginés par Kevin Eastman et Peter Laird en 1983 pour

parodier les très sérieux superhéros américains. Le mélange des genres, où les reptiles les plus lents deviennent agiles et experts en arts martiaux, a rapidement remporté un vif succès. Notons que ces tortues mutantes, bipèdes et présentant des dents ainsi qu'un nombre réduit de doigts, sont anthropoïdes.

D'autres tortues anthropomorphes, mais moins sympathiques, peuplent aussi l'imaginaire japonais : c'est le cas de Bowser, tortue jaune aux cheveux rouges et adversaire de Mario dans le jeu vidéo, ou encore de Gamera de la série éponyme, horrible



LA GRANDE A'TUIN est une tortue portant sur son dos quatre éléphants qui soutiennent le Disque-monde. Cet univers, imaginé par Terry Pratchett et illustré par Josh Kirby, est le théâtre des aventures de personnages hauts en couleur tels que Rincevent ou Mémé Ciredutemps.

© Avec l'aimable autorisation des curateurs des biens de Josh Kirby



LA TORTUE ARCHELON est la plus grande de son groupe. Elle a disparu il y a environ 80 millions d'années et mesurait près de 4 mètres de long pour 5 mètres d'envergure.

kaiju (monstre géant généralement mutant) muni de défenses et capable de voler. Ces tortues fantastiques ont une carapace très ornementée et crachent même du feu !

Un autre personnage récemment rencontré dans le dernier *Star Wars* (*Épisode VII, le Réveil de la Force*, J.J. Abrams, 2015) présente aussi certains attributs de chéloniens : il s'agit de Maz Katana, vieille amie de Han Solo qui tient une taverne sur la planète Takodana. L'absence de nez proéminent, ses yeux de petite taille, sa bouche pincée, sa peau fine, plissée et orange la rapprochent en effet de *Terrapene carolina*, petite tortue nord-américaine et mexicaine mieux connue sous le nom de « tortue boîte » ou « tortue tabatière ».

Certes, Maz Katana ne présente pas de carapace, mais sa longévité (plus de 1 000 ans, contre 800 à 900 pour maître Yoda) rappelle aussi celle des tortues : l'espérance de vie maximale d'une tortue sauvage est estimée à environ 150 ans, comme le suggère « Georges le Solitaire », célèbre tortue mâle des Galápagos (*Chelonoidis nigra*) décédée à plus de 100 ans.

Cette longévité, ainsi que leurs mouvements très lents, confère aux tortues une apparente nonchalance, comme si elles avaient toute l'éternité devant elles. Elles sont synonymes de sagesse dans de nombreuses cultures traditionnelles, par exemple en Australie, au Vietnam ou en Chine – où de très vieux idéogrammes ont été découverts gravés sur d'anciens plastrons de tortues. Entre art et mythologie, un étrange

reptile légendaire muni de six yeux et d'une carapace très ornementée vivrait caché dans le désert du Taklamakan, à l'ouest de la Chine. Le plasticien Jamel Zeddam, alias Monsieur Z, a inventé et sculpté cette tortue mystique dont les trois paires d'yeux lui permettent de voir les trois temps de la vie : le passé, le présent et le futur.

Un record de taille

Tout aussi fictive, dans le film *Le Monstre des Bermudes* (Tom Kotani, 1978), une tortue marine, victime d'une mutation, devient un monstre géant. Ce scénario emprunté à la cryptozoologie rappelle que des organismes à sang froid et à croissance continue peuvent atteindre des tailles considérables, surtout lorsqu'ils sont aquatiques. Les chéloniens n'échappent pas à la règle, puisque le record est actuellement détenu par une tortue luth (tortue marine cuirassée ou *Dermochelys coriacea*) mâle retrouvée échouée sur une plage britannique en 1988, longue d'environ 3 mètres pour 914 kilogrammes – le spécimen naturalisé est exposé au Muséum national de Cardiff.

Ces mensurations restent cependant modestes comparées à celles d'*Archelon ischyros*, autre tortue marine (voir l'illustration ci-dessus) mais disparue il y a environ 80 millions d'années : des fossiles de ce monstre de près de 4 mètres de long, 5 mètres d'envergure et plus de 2 tonnes ont été découverts dans des sédiments marins du Dakota,

aux États-Unis. Avec ses énormes pattes en forme de rame, *Archelon* montre que les chéloniens étaient bien diversifiés à l'époque des dinosaures.

L'évolution du groupe n'est pas récente : une des plus anciennes tortues, *Odontochelys*, a été mise au jour en Chine, dans des sédiments âgés d'environ 220 millions d'années. Cette tortue côtière adulte présente un bec muni de dents, un plastron bien ossifié mais une dossière dépourvue d'ostéodermes et composée uniquement de larges côtes fusionnées (comme chez les embryons de tortues actuelles).

Hélas, comme ses rares cousines du Trias, *Odontochelys* arbore une morphologie tellement dérivée que les paléontologues ont beaucoup de mal à rattacher le groupe à d'autres reptiles fossiles ou actuels. L'origine des tortues demeure donc un mystère. Et leur évolution n'est pas un long fleuve tranquille, les chéloniens ayant traversé plusieurs grandes extinctions (celle du Trias-Jurassique il y a environ 200 millions d'années, celle du Crétacé-Tertiaire il y a environ 66 millions d'années...). Si les tortues se rencontrent sur une bonne partie du globe, 42 % des espèces sont menacées d'extinction. Espérons qu'elles passeront la sixième extinction à venir, et que l'espérance de vie du groupe soit à la mesure de celle des individus...

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

Percer le secret des méduses

Ces animaux sont certes synonymes de piqûres cuisantes et de vacances ratées, mais ils constituent également un monde fascinant où l'élégance le dispute à l'immortalité. Ils sont aussi le reflet de nos liens avec l'environnement.

Loïc MANGIN

L'été approche à grands pas, les réservations d'hôtel et de trains sont faites, et, dans votre tête, vous y êtes déjà... Pour certains, ce sera la mer et la plage ; outre les caprices de la météo, une incertitude plane sur la réussite de leurs congés, une inconnue gélatineuse et urticante : les méduses ! Y en aura-t-il au point d'interdire toute baignade et d'entraîner une ruée vers la montagne l'année prochaine ? Plutôt que de les honnir, si nous profitons des quelques semaines qui précèdent le départ pour mieux les connaître ?

Pour ce faire, rendez-vous à l'Aquarium de Paris afin de découvrir les secrets de ces créatures qui, si elles gâchent parfois la baignade, n'en restent pas moins fascinantes. L'établissement vient en effet d'inaugurer un « Médusarium ». Il s'agit de cinq bassins où évoluent autant d'espèces de méduses. Ils sont le fruit de plusieurs mois de collaboration avec des experts scientifiques du monde entier, notamment les équipes renommées de l'aquarium de Kamo, à Tsuruoka, au Japon. Dans une ambiance bleutée mettant en valeur leur délicatesse, ils donnent l'occasion – rare – d'admirer la grâce légère de ces animaux en mouvement. Le spectacle ne doit pas faire oublier l'éducation, et de nombreux outils pédagogiques sont là pour l'enrichissement des visiteurs.

On apprend ainsi que les méduses (des cnidaires) sont apparues il y a 600 à 650 millions d'années et seraient parmi les premiers organismes multicellulaires. On en connaît

aujourd'hui quelque 1 500 espèces dont les plus grosses, telle *Cyanea capillata*, mesurent plus de 2 mètres de diamètre avec des tentacules longs de 30 mètres. Les espèces privilégiées par l'Aquarium de Paris (*cliché c*) sont plus petites...

Les relations avec l'environnement ont une place de choix. Par exemple, on est alerté sur les dangers de la gélification – une importante pullulation des méduses qui fait de la mer une masse... gélatineuse. Les causes sont multiples et mal connues : on incrimine le réchauffement climatique, la surexploitation des ressources océaniques, la pollution...

***Turritopsis nutricula*
peut retrouver sa forme juvénile
après avoir atteint sa maturité
sexuelle : elle est immortelle.**

L'Aquarium de Paris célèbre l'ouverture de son Médusarium en proposant jusqu'au 30 juin 2016 deux expositions autour des méduses. D'abord, l'artiste israélien Micha Laury montre *Jellyfish* (« méduse » en anglais), une installation d'envergure constituée de 29 méduses en silicone aux couleurs acidulées d'environ 2,6 mètres de longueur (*cliché b*). Le banc est suspendu dans la haute nef de l'établissement.

Michel Laury, dont plus d'une vingtaine d'œuvres figurent dans les collections du centre Georges Pompidou à Paris, s'intéresse aux paradoxes. Alors, pourquoi les

méduses ? Pour l'artiste, elles sont synonymes de fascination et de répulsion, de beauté et de danger, mieux encore, de mort et d'immortalité. Ce dernier point fait référence à l'espèce *Turritopsis nutricula*, capable d'inverser son processus de vieillissement et retrouver sa forme juvénile après avoir atteint sa maturité sexuelle.

L'autre exposition est intitulée *Méduses et poètes*. Elle met en regard des reproductions de vélins de Charles-Alexandre Lesueur (1778-1846) avec des textes choisis par Jacqueline Goy, spécialiste des méduses. Ainsi, *Chrysaora hysoscella* (*figure a*) est illustrée par l'extrait d'un poème de Frédéric Tristan (prix Goncourt en 1983) tiré de son recueil *Le Bal des gorgones*.

À la fin du XVIII^e et au début du XIX^e siècles, le dessinateur accompagne le naturaliste François Péron dans de nombreuses expéditions. De cette collaboration naîtra l'une des plus importantes collections d'illustrations de méduses (des animaux peu connus à cette époque). Quelques erreurs d'identification ont été réparées, et ces œuvres sont désormais le point de passage obligé pour tout étudiant s'intéressant aux méduses.

Elles sont aussi indispensables, avec le Médusarium et *Jellyfish*, à tout vacancier qui voudrait savoir à quoi tient la qualité de son séjour balnéaire : un peu de gélatine ! ■

Jellyfish et Méduses et poètes, jusqu'au 30 juin 2016, à l'Aquarium de Paris. www.cineaquarium.com