

visité une infinité de fois. On raisonne alors comme pour notre « premier étonnement » à propos du rotor-router sur le plan : les nœuds voisins de N voient aussi passer l'agent une infinité de fois, de même que les voisins des voisins de N , etc.

Plus étonnant et même franchement miraculeux : après une période d'errance, l'agent entre dans un parcours cyclique qui est un parcours eulérien du graphe orienté G' associé à G . Précisons ici ce que sont les parcours eulériens de G' . Le graphe que nous avons considéré a des arêtes non orientées. Si l'on remplace chacune des arêtes de G par deux arêtes orientées, une pour chaque sens de parcours, cela donne un graphe G' orienté associé à G . Un parcours eulérien du graphe G' est alors un chemin qui emprunte chaque arête orientée une fois exactement. Ce chemin empruntera donc chaque arête du graphe G deux fois exactement.

Un parcours eulérien pour sortir de tout labyrinthe

Le théorème d'Euler indique que si un graphe orienté connexe est tel que chaque nœud a autant d'arcs arrivant sur lui que d'arcs qui en sortent, alors il existe nécessairement un parcours eulérien du graphe. Ici, le graphe G' a la propriété demandée (car chaque arc non orienté de G a donné deux arcs orientés opposés dans G'). Il n'y a donc pas de surprise à ce qu'un tel parcours eulérien de G' existe. En revanche, que l'agent posé n'importe où en trouve un tout seul, simplement parce qu'il utilise les rotors du graphe, est inattendu. L'agent n'a aucune mémoire propre, et pourtant il réalise une tâche qui semble exiger de se souvenir de ce que l'on fait et d'avoir une vision globale du graphe (*voir l'encadré page précédente*) !

Ce résultat fournit à un agent sans aucune mémoire une méthode sûre pour parcourir entièrement un graphe. Concrètement, cela vous indique un procédé pour sortir d'un labyrinthe, aussi compliqué soit-il... si vous disposez d'une craie. En effet :

— À chaque fois que vous passez dans un carrefour du labyrinthe, vous dessinez au centre du carrefour une flèche que vous faites tourner à chaque passage (vous effacez la précédente, et vous dessinez une nouvelle flèche pointant vers la branche suivante du carrefour dont, lors du premier passage, vous avez numéroté les branches). Cette flèche joue le rôle d'un rotor. Même si vous êtes totalement amnésique, vous serez assuré de parcourir tout le labyrinthe et donc d'en trouver la sortie... ou le trésor.

Terminons en mentionnant quelques jolis résultats obtenus sur le problème de la patrouille sur un graphe infini connexe.

Supposons un graphe (non orienté) infini et connexe (par exemple celui associé au quadrillage infini du plan). On a fixé des rotors en chaque nœud (ou case) et déposé un agent en un nœud N . L'agent se déplace indéfiniment sur le graphe en faisant tourner les rotors. Deux cas seulement sont possibles : soit chaque nœud est visité une infinité de fois (cas dit récurrent), soit aucun nœud n'est visité une infinité de fois (cas transitoire).

La démonstration s'appuie à nouveau sur l'idée que si un nœud est visité une infinité de fois, il en est de même de ses voisins, donc des voisins de ses voisins, etc. Plus inattendus sont les résultats suivants :

— Si un graphe infini connexe est donné ainsi qu'une configuration des rotors, et qu'en déposant un agent en un nœud N , on se trouve dans le cas récurrent, alors en déposant l'agent n'importe où, on se trouvera aussi dans le cas récurrent.

— Quand on considère le graphe du quadrillage (chaque case est reliée à ses quatre voisines nord, sud, est et ouest) ou sa généralisation en dimension k ($k > 2$), il existe des configurations initiales des rotors qui produisent le cas récurrent.

— Pour tout graphe infini connexe, il existe une façon de fixer les positions initiales des rotors de manière à avoir une configuration récurrente.

Le simplissime mécanisme du rotor-router n'a pas encore livré tous ses secrets. Il occupera encore un bon moment mathématiciens et informaticiens.

LES AUTEURS



Jean-Paul DELAHAYE et Philippe MATHIEU sont professeurs à l'université de Lille et chercheurs au laboratoire CRISTAL (Centre de recherche en informatique, signal et automatique de Lille).

BIBLIOGRAPHIE

A. Kosowski et D. Pajak, *Does adding more agents make a difference ? A case study of cover time for the rotor-router*, *Automata, Languages and Programming*, LNCS 8573, Springer, pp. 544-555, 2014.

D. Dereniowski *et al.*, *Bounds on the cover time of parallel rotor walks*, *STACS 2014*, pp. 263-275, 2014.

L. Florescu *et al.*, *The range of a rotor walk*, prépublication arXiv:1408.5533, 2014.

O. Angel et A. Holroyd, *Rotor walks on general trees*, *SIAM Journal on Discrete Mathematics*, vol. 25(1), pp. 423-446, 2011.

Références supplémentaires sur www.pourlascience.fr



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

SCIENCE & FICTION

L'art de fabriquer des monstres

À quoi ressembleraient les animaux dans 10 millions d'années ? Avec quelques notions de biologie et de paléontologie, il est possible de l'imaginer.

Jean-Sébastien Steyer, Marc Boulay et Roland Lehoucq

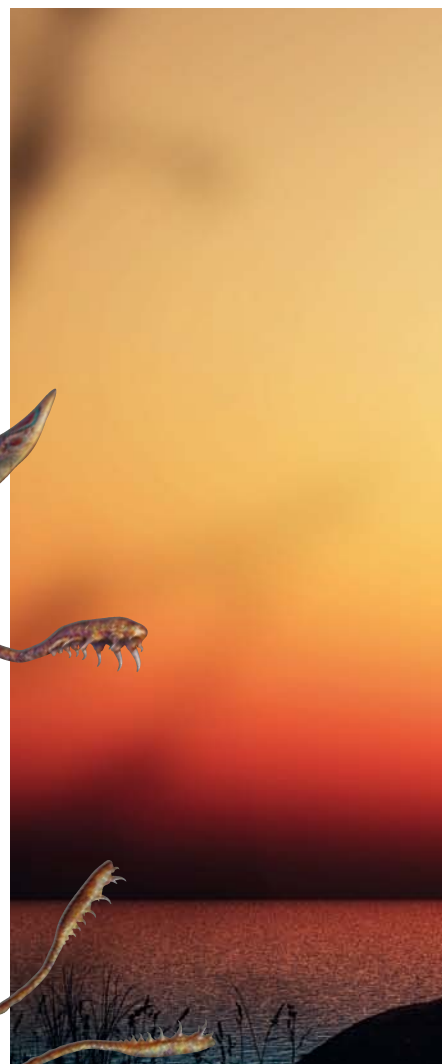
Vers géants, krakens tentaculaires, farouches quadrupèdes ou insectoïdes de l'espace, les monstres de la science-fiction constituent ce que nous pourrions nommer une étonnante « exobiodiversité » ! Face à ce foisonnement d'espèces fictives, on se demande : d'où vient cette intarissable imagination et comment de tels monstres peuvent-ils être plausibles ?

Dans les romans de science-fiction, les auteurs imaginent des monstres avec une description plus ou moins plausible ou originale en fonction de leurs connaissances en biologie. Au cinéma, l'image ne suggère plus mais montre. Dès lors, le monstre doit être crédible à l'écran. Créer ces animaux est devenu un véritable métier, celui de *creature designer* ou « concepteur de bestiaire ». Ces spécialistes, qui s'attachent à ce que leur bestiaire soit réaliste, sont souvent des artistes naturalistes jouissant donc d'une double compétence (art et science).

Ils doivent alors considérer de nombreux aspects de leurs animaux : sont-ils adaptés à leur environnement ? Leurs mouvements, leur attitude sont-ils crédibles ? Ces questions sont une étape indispensable pour que les personnages que l'on rencontre dans la saga *Star Wars* (George Lucas, 1977 pour le premier opus), dans *Avatar* (James Cameron, 2009), etc. soient le plus « authentiques » possible.

LES DESCENDANTS DES SEICHES
ressembleront-ils à ces animaux ? C'est le genre de réflexions que propose l'évolution spéculative, où l'on imagine des mutations aléatoires et les conséquences de la pression de sélection exercée par l'environnement.

Inventer des monstres — ou plus généralement des êtres fantastiques — est une activité ancienne : dans de nombreuses cultures, certaines divinités sont représentées par des hommes ou des femmes affublés de têtes d'animaux. En Égypte antique, la plupart des divinités (plus d'un millier !) sont zoomorphes. En Grèce antique, les auteurs peuplaient leurs récits héroïques (*l'Illiade*, *l'Odyssée*, etc.) de chimères telles que le minotaure (homme à tête de taureau), Pégase (cheval ailé) ou l'hippogriffe (cheval à tête et membres antérieurs d'aigle), pour ne citer qu'eux. L'exercice de création de chimères est simple et consiste alors à assembler une espèce réelle (un cheval, par exemple) et des éléments d'une autre espèce existante (des grandes ailes de cygne) afin de créer l'exotisme et l'étonnement. Cette ancienne « fabrique de monstres », même si elle est encore parfois

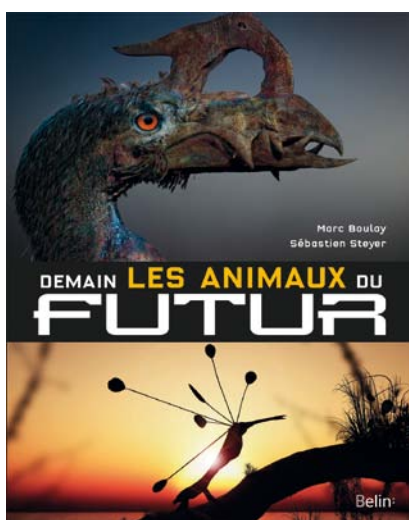




Toutes les illustrations sont de Marc Boulay, marcoulay.fr, cossima-productions.com

utilisée, est un peu désuète. En effet, les avancées en sciences naturelles en général, et en génétique en particulier, nous ont montré que la construction et la formation d'un organisme ne sont pas un simple jeu de Lego.

Pour éviter que leurs espèces fantastiques ne deviennent donc fantasques, les concepteurs de bestiaire d'aujourd'hui pratiquent la biologie spéculative. Ce n'est pas une science, dans la mesure où elle n'est pas testable dans un cadre hypothético-déductif, mais plutôt une sorte de jeu intellectuel dont les règles sont celles des sciences. Il s'agit d'imaginer des formes de vie plausibles, que ce soit dans l'univers réel (exobiologie spéculative), sur une Terre du futur (évolution spéculative) ou dans des histoires parallèles (uchronie biologique). L'exercice se doit d'être rigoureux et de prendre en compte des données bien réelles, comme celles relatives à la sélection naturelle ou aux contraintes



DANS DEMAIN, LES ANIMAUX DU FUTUR, le sculpteur Marc Boulay et le paléontologue Jean-Sébastien Steyer imaginent des animaux dans 10 millions d'années.

physiques du lieu où est censée se dérouler l'action (gravité de la planète, composition atmosphérique, climat, environnement, etc.). Elle n'en reste pas moins spéculative, l'évolution étant imprévisible.

Un précédent sous forme de canular

En 1962, les zoologistes Gerolf Steiner, sous le pseudonyme d'Harald Stümpke, et Pierre-Paul Grassé, faisant office de préfacier, signent *Anatomie et biologie des Rhinogrades*. Ce croustillant ouvrage présente d'une façon rigoureuse et institutionnelle une faune imaginaire, ou plutôt un groupe de mammifères fictifs caractérisés par un appendice nasal très développé – d'où leur nom vernaculaire de « nasins ». Si Grassé nous avertissait du caractère fictif de l'œuvre, « biologiste, mon bon ami, souviens-toi que

les faits les mieux décrits ne sont pas toujours les plus vrais », ce pavé dans la mare, pour l'époque, posait déjà les jalons de la biologie spéculative.

Cependant, à cause d'un contexte académique peut-être trop rigide, cette discipline ne sera en vogue qu'à partir des années 1980, surtout grâce au paléontologue américano-canadien Dale Russell.

En 1981, intrigué par la boîte crânienne volumineuse du dinosaure qu'il est en train de décrire (théropode mieux connu aujourd'hui sous le nom de *Troodon*), Dale Russell fait appel à son collègue et artiste taxidermiste Ron Seguin pour imaginer un

dinosaure uchronique et intelligent qui aurait survécu à l'extinction Crétacé-Tertiaire ! On retrouve cette idée dans *Dinotopia* (1992), un monde inventé par James Gurney où cohabitent les humains et les dinosaures.

L'évolution spéculative, qui invente des espèces futuristes, a aussi le vent en poupe. La même année, le géologue Dougal Dixon signe *After Man : A Zoology of the Future* (« Après l'Homme, les animaux du futur »), dans lequel il imagine diverses formes de vie sur Terre dans 50 millions d'années. Il intègre les modèles de la tectonique des plaques ainsi que des réflexions sur l'évolution du climat à sa démarche.

Neuf ans plus tard, dans une sorte d'anthropologie spéculative illustrée (*Man After Man : An Anthropology of the Future*, 1990), le même Dougal Dixon se penche sur le cas du genre *Homo*. Certains de ses « humains » sont largement inspirés de stéréotypes (hommes à grosses têtes, hommes aquatiques, etc.) des grands classiques d'anticipation tels ceux de Herbert G. Wells ou encore de René Barjavel. Le géologue créatif devient ensuite consultant pour une série documentaire : *The Future is Wild* (« Le Futur sera sauvage », 2002) qui donne vie à des écosystèmes complexes imaginés sur Terre dans le futur.

Donner vie aux animaux du futur

J'ai commencé à travailler sur des animaux imaginaires en 1995 pour le film en images de synthèse *Kraken, future ocean*. L'histoire était écrite par Dougal Dixon, un paléontologue écossais, qui a imaginé un monde 50 millions d'années après la disparition de l'humanité.

Je sculptais les animaux à partir d'esquisses de l'auteur de façon à les rendre crédibles d'un point de vue biomécanique. Les sculptures étaient ensuite scannées pour les besoins du film.

En 2000, j'ai créé le projet *Demain, les animaux du futur*. Pour conceptualiser et créer ces environnements et ces animaux du futur, j'ai demandé de l'aide à Jean-Sébastien Steyer, fort de son expertise

scientifique en matière d'évolution.

Le point de départ de ce projet est que, pour moi, il n'y a pas plus d'inexactitudes à reconstituer un dinosaure en partant d'éléments fossiles que de constituer un animal du futur en partant de matériel contemporain. Tous deux font appel aux mêmes disciplines scientifiques : l'anatomie comparée, la biomécanique, les

processus de l'évolution et la paléontologie.

La naissance de chaque animal se fait en plusieurs étapes. Avant d'imaginer le futur, j'étudie le passé et le présent, je me familiarise avec la physiologie des animaux actuels, leur façon de se déplacer et leur posture grâce à des documentaires animaliers, l'observation en terrarium, en aquarium et sur le terrain. J'imagine alors un animal (parfois Jean-Sébastien me suggère une idée) dont je crée une esquisse. Le résultat est envoyé à Jean-Sébastien qui l'analyse d'un point de vue scientifique. Nos nombreux échanges permettent d'affiner le concept.

Commence alors le travail de sculpture. J'ai opté pour la puissance d'un outil de sculpture numérique et organique utilisé pour de nombreux films, tel *Avatar* (James Cameron, 2009). Je commence par le squelette de l'animal, puis les muscles et enfin la structure globale. L'animal est ensuite placé dans un environnement tridimensionnel. Le rendu doit être généré, ce qui peut prendre plusieurs jours sur un ordinateur puissant. Il reste alors à ajuster la composition pour obtenir l'image finale en haute définition.

Marc Boulay

Sculpteur numérique et animalier

DES MUTATIONS ALÉATOIRES et la sélection naturelle auraient conféré au descendant de la scolopendre la capacité de planer longuement lors de sauts dans les canopées tropicales. Les segments de son corps se sont élargis et forment une sorte d'aile qui augmente la portance de l'animal. Ses antennes, plus courtes que celles de son ancêtre, ne la gênent pas pour voler.



L'exobiologie spéculative n'a pas été en reste ; elle a envahi les écrans avec *Alien Planet* (2005), une autre série, orchestrée par le concepteur de bestiaire et illustrateur Wayne Barlowe qui imagine un monde plausible sur une autre planète. Citons aussi *Alien World* (2005) où, à la demande de la chaîne National Geographic, des scientifiques ont « construit » deux planètes (Aurelia et Blue Moon) sur lesquelles ils imaginent ensuite des formes de vie plausibles. Ces documentaires dépeignent de nouveaux astres, climats, écosystèmes, espèces etc. et nous ont donc fait passer de la planétologie à l'écologie spéculative : la spéculation est devenue multidisciplinaire !

Avec l'archéologue Jean-Paul Demoule et l'auteur de science-fiction Pierre Bordage, deux d'entre nous (R. Lehoucq et J.-S. Steyer) avons fait un pas de plus dans ce genre d'exercice en ajoutant une « histoire spéculative ». En effet, dans notre ouvrage *Exquise Planète* (2014), une espèce extraterrestre devient fortuitement assez intelligente pour créer sa propre histoire.

Cet ouvrage est proche de la catégorie « hard science fiction », un courant dans lequel les auteurs s'attachent à raconter des histoires tout en étant soucieux de respecter les connaissances scientifiques du moment – que ce soit en sciences physiques, naturelles ou humaines. C'est aussi un formidable moyen de diffusion du savoir auprès du grand public, puisque l'on met en scène les grandes avancées scientifiques récentes telles que la découverte d'exoplanètes, de plus en plus nombreuses, mais aussi celle,



CE PERROQUET SUPERPRÉDATEUR est le fruit d'une évolution spéculative. Pour l'imaginer, Marc Boulay et Jean-Sébastien Steyer se fondent notamment sur le processus de sélection naturelle. Ils ont imaginé l'extinction de certains grands mammifères terrestres, et la réoccupation de certaines niches écologiques au sol par les oiseaux. Une mutation, chez le perroquet, a réactivé des gènes qu'il a hérités de ses cousins, les dinosaures. L'oiseau exhibe des pseudo-dents acérées, un avantage certain pour ce prédateur du futur.

sur Terre, d'espèces extrémophiles ou présentant des morphologies « hors norme » (pour ne pas dire « extraterrestres »), qu'elles soient actuelles ou fossiles.

Imaginer des écosystèmes complets

Paléontologie et biologie spéculative se rejoignent sur certains aspects : si la paléontologie est bien une discipline scientifique (elle met en œuvre des méthodes testables, la phylogénie par exemple), le paléontologue souhaitant reconstruire un dinosaure (ou autre espèce disparue) doit faire preuve d'un minimum d'imagination, ne serait-ce que pour se faire une idée de sa couleur par exemple. Cette imagination est d'autant plus importante que le fossile est fragmentaire.

Pour redonner vie à une espèce, une solution consiste à travailler avec un « paléo-artiste », c'est-à-dire un artiste spécialisé dans les reconstitutions paléontologiques. Deux d'entre nous, le sculpteur (M. Boulay) et le paléontologue (J.-S. Steyer), ont combiné leurs domaines d'expertise pour transposer cette démarche appliquée aux animaux du passé à des espèces plausibles – aquatiques, amphibiens, terrestres ou volantes – qui pourraient exister sur Terre dans 10 millions d'années, à la façon de Dougal Dixon. Le livre *Demain, les animaux du futur* est le fruit de cette coopération de quinze années.

Quel type de réflexions peut-on ainsi avoir en évolution spéculative ? Nous sommes partis de l'idée que la plupart des grands mammifères terrestres disparaissent à la suite d'une extinction massive comparable à celle qu'ont connue les dinosaures non-aviens. De nombreuses niches écologiques sont alors vacantes sur la terre ferme. Les oiseaux, jusque-là souvent menacés par des prédateurs au sol, pourraient bien investir ces nouveaux territoires. Certains pourraient perdre leurs ailes au profit de puissantes pattes arrières (tels les descendants du perroquet, *ci-dessus*, ou du colibri, *page 83*). Ils gagneraient en agilité et pourraient bien être retenus par la sélection naturelle.

En outre, en faisant le choix de ne pas faire apparaître l'humanité dans ce scénario, ce livre est aussi une invitation à considérer notre impact sur la planète.

La biologie spéculative, loin d'être un exercice futile réservé à quelques adeptes, peut donc être utile pour mieux appréhender le réel. Elle est une fabrique de faux qui questionne le vrai, et l'évolution spéculative invente un futur plausible pour mieux comprendre le présent. ■

J.-S. STEYER est paléontologue au CNRS-MNHN, à Paris. M. BOULAY est sculpteur animalier et sculpteur numérique. R. LEHOUCQ est astrophysicien au CEA, à Saclay.



ART & SCIENCE

Les paréïdolies artificielles

Les algorithmes de Google, lorsqu'ils sont livrés à eux-mêmes, font surgir d'une image des éléments (oiseaux, chiens, pagodes...) qui n'existent pas. Ce phénomène est semblable à celui qui vous fait distinguer des visages dans les nuages.

Loïc MANGIN

Connaissez-vous la paréïdolie ? Sans doute, même si le nom vous avait échappé, car ce phénomène consiste à distinguer des formes connues dans des images où elles sont pourtant absentes. Vous avez tous vu des visages ou des animaux « apparaître » dans les nuages, dans la mousse d'un café, dans un rocher... La paréïdolie expliquerait les visions de figures iconiques ou religieuses, telle cette Vierge Marie perçue sur un toast, lequel a été vendu 28 000 dollars en 2004. Ces cas extrêmes ne doivent pas faire oublier que cette tendance à créer du sens à partir de formes aléatoires est utile au cerveau qui cherche sans cesse à structurer son environnement.

La paréïdolie serait donc l'apanage des humains, ou au moins des animaux dotés d'un cerveau suffisamment complexe ? Pas nécessairement. Les ingénieurs de Google ont découvert que les machines qu'ils mettent au point pour la reconnaissance d'images identifient aussi des formes qui n'existent pas. Ils ont nommé ce phénomène « inceptionnisme », en référence au film *Inception* de Christopher Nolan dans lequel les héros modifient le subconscient d'individus via des rêves partagés.

Chez Google, l'histoire commence quand les spécialistes se penchent sur le fonctionnement interne des « réseaux de neurones » qu'ils développent pour classer les images. Les réseaux de neurones sont des algorithmes, calqués sur le fonctionnement des neurones biologiques, où des neurones

formels reçoivent des informations (venues d'autres neurones) et en émettent (vers d'autres neurones) selon des paramètres prédéfinis. Par exemple, et de façon très simplifiée, un neurone peut collecter plusieurs nombres transmis par des neurones en amont et transférer en aval la somme de ces nombres lorsqu'elle dépasse un certain seuil. Les neurones formels sont souvent agencés en couches intercalées (de 10 à 30 le plus souvent) entre les neurones d'entrée et ceux de sortie.

Les ingénieurs de Google ont entraîné leurs réseaux de neurones avec des millions d'images et en ajustant les paramètres de chaque neurone de façon à obtenir une classification correcte des images. Dans le mille-feuille du réseau, à mesure que l'on s'approche de la décision finale (ce que représente l'image soumise) par la dernière couche, les neurones extraient des caractéristiques toujours plus fines de l'image. Ainsi, une première couche peut repérer les coins et les bords, la suivante s'intéressera aux motifs, etc.

Pour en savoir plus sur ce qui se passe à l'intérieur du réseau, on peut le prendre à l'envers et se demander quelles images conduisent à une réponse prédéfinie, par exemple une banane. Pour répondre, on commence avec une image pleine de bruit aléatoire, puis on la modifie progressivement jusqu'à ce que le réseau y identifie une banane. On obtient en quelque sorte des images que le réseau de neurones a créées lui-même. Cette démarche renseigne

sur les caractéristiques essentielles que le réseau de neurones extrait de l'objet en question (ici la banane).

Une autre fenêtre sur le fonctionnement interne du réseau consiste à ne pas lui indiquer les caractéristiques qu'il doit repérer et amplifier pour reconnaître une image. À partir d'une image quelconque, on regarde alors ce que les couches du réseau ont détecté et retenu, puis on demande à l'algorithme d'insister sur les éléments identifiés. En d'autres termes, l'idée consiste à demander au réseau : « Quoi que tu vois, rends-le encore plus visible. » Ainsi, dès qu'un

a Un paysage naturel rempli de sérénité (a) devient une cité lacustre onirique (b) quand il est scruté par les algorithmes de Google.

