

caèdre rhombique, l'octaèdre tronqué, et le gyrobiprisme triangulaire [deux prismes triangulaires collés l'un à l'autre par leur face carrée en s'arrangeant pour que les triangles n'aient pas de côtés communs].

En supprimant l'exigence que les faces soient des polygones réguliers, on obtient une famille infinie de polyèdres pavant l'espace. En supprimant l'exigence de convexité, la famille s'agrandit encore. Si, de plus, on accepte d'utiliser plusieurs polyèdres pour un seul pavage de l'espace, les systèmes de pavages deviennent si nombreux qu'aucun classement complet n'en a été produit, et d'ailleurs on en découvre régulièrement de nouveaux.

Une classification partielle des pavages de l'espace par des polyèdres a été proposée par Michael Goldberg en 1980, et une liste de 42 systèmes de polyèdres pavant l'espace a été détaillée par Peter Pearce dans son livre *Structure in Nature is a Strategy for Design* (1978). Cette liste a été utilisée par le groupe de recherche sur les Spidrons et a servi à concevoir d'autres systèmes de polyèdres pavant l'espace, composés de polyèdres spidronisés.

En 2009, Walt van Ballegooijen, Paul Galiunas et D. Erdély ont ainsi construit 42 nouveaux systèmes de polyèdres spidronisés ayant tous la propriété de remplir parfaitement l'espace. Dans ce travail, il a fallu être très attentif au sens de rotation des spirales utilisées, car, pour que deux faces de polyèdres spidronisés s'emboîtent parfaitement, il faut qu'elles soient basées sur des spirales tournant dans des sens opposés [sur http://spidron.hu/spidronised_spacefillers/main.html, une magnifique présentation de ce travail est visible, comportant plusieurs petits films].

Pavages apériodiques

Les membres du groupe se sont aussi intéressés au classique problème des pavages apériodiques du plan. On recherche un jeu de formes planes (chacune est disponible en quantité illimitée) pouvant paver le plan sans trou, ni chevauchement, et ne pouvant le faire que de manière non périodique (aucune translation ne doit laisser inva-

riant le pavage). La présente rubrique de novembre 2013 donnait quelques exemples de ces jeux de formes, et présentait en particulier le pavage apériodique n'utilisant qu'une seule tuile décorée, récemment découvert par Joan Taylor.

Ici, le jeu a consisté à trouver des tuiles apériodiques qui soient chacune construites avec un crochet de type Spidron. Le défi semblait délicat. Il a pourtant été relevé et un jeu de deux tuiles spidronisées apériodiques a été trouvé. Ces tuiles sont construites sur le modèle des deux tuiles de Roger Penrose dénommées la « flèche » et le « cerf-volant ». Les chercheurs se sont amusés à reprendre la couverture du *Scientific American* de 1977 qui présentait un pavage de Penrose avec des flèches et des cerfs-volants, et ils l'ont transformé en un pavage avec leurs tuiles spidronisées (voir la figure 5).

Spidrons sur le plan hyperbolique

Paver le plan jusqu'à l'infini est intéressant, mais il existe une représentation géométrique plus concrète de l'infini, celle du plan hyperbolique modélisé dans un disque. On imagine que plus on s'éloigne du centre d'un disque, plus il devient difficile d'avancer, au point qu'il est impossible d'atteindre la frontière du disque, laquelle joue le rôle d'un horizon, à distance finie. Cette géométrie particulière, où par un point passent plusieurs parallèles à une droite donnée, oblige à revoir les pavages usuels du plan, qui ne conviennent plus. Se pose alors la question de savoir si ce plan hyperbolique est pavable par des formes spidronisées. La réponse positive a été donnée par Craig Kaplan (voir la figure 6 et <http://www.cgl.uwaterloo.ca/ffcsk/projects/spidron/>).

Les magnifiques formes construites à partir de Spidrons sont le résultat du travail d'artistes s'occupant de design et de mathématiciens qui se fondent sur une tradition millénaire. Leur dialogue permet à chaque groupe de bénéficier du savoir-faire et des visions de l'autre. Il doit se poursuivre. ■

■ L'AUTEUR



J.-P. DELAHAYE
est professeur
émérite
à l'Université
de Lille
et chercheur
au Laboratoire d'informatique
fondamentale de Lille (LIFL).

Le blog de Jean-Paul Delahaye
sur Scilogs.fr:
www.scilogs.fr/complexites/

■ BIBLIOGRAPHIE

The New Spidron, 2014:
<http://www.spidron.hu/>

Spidron System, 2014:
<http://edan.szhaz.org/SpidronNew/index.html>

W. van Ballegooijen et al.,
Spidronised space-fillers,
Bridges 2009 Proceedings.

D. Erdély et M. Pelletier, Spidron
domain expanding Spidron
universe, Bridges 2006
Proceedings, pp. 549-550.

D. Erdély, Some surprising new
properties of Spidrons,
Bridges 2005 Proceedings,
pp. 179-186.

Groupe de recherche
autour du Spidron :
Dániel Erdély, Gergo Kiss,
Peter Koszegi, Emil Molnar,
Laszlo Beke, Lajos Szilassi,
Rinus Roelofs,
Cristiana Grigorescu,
Paul Galiunas, Miklos Laczkovich,
Walt van Ballegooijen,
Amina Buhler-Allen, Janos Erdos,
Marc Pelletier.



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

SCIENCE & FICTION

Godzilla, le réveil d'un dinosaure ?

Ce monstre légendaire de la culture japonaise fascine par sa taille et sa force. Mais d'où vient ce destructeur des villes, hybride de plusieurs espèces disparues ?

Jean-Sébastien STEYER et Roland LEHOUCQ

Godzilla revient sur les écrans en mai 2014. Ce reptile mutant, apparu à la suite d'une catastrophe nucléaire, symbolise la revanche de la nature sur la folie des hommes. Sa morphologie impressionnante, sa taille démesurée et sa crête dorsale évoquent certains dinosaures, mais il semble aussi s'inspirer d'autres espèces. Quelle est donc sa véritable identité ?

Godzilla apparaît pour la première fois à l'écran en 1954, dans un contexte très tendu entre les États-Unis et le Japon, encore traumatisé par la guerre. Le reptile mutant est réveillé par des explosions nucléaires dans l'océan Pacifique. Le film ne fait cependant pas référence aux horreurs de Hiroshima ou de Nagasaki (responsables de 400 000 victimes) mais à un grave incident diplomatique : la contamination du thonier *Daigo Fukuryu Maru* par les retombées radioactives d'un test nucléaire américain au large de l'atoll de Bikini, en mars 1954. Les États-Unis, ayant sous-estimé la puissance de leur bombe, reconnaîtront difficilement leur faute... Le réalisateur Ishiro Honda s'empare de l'affaire et crée Godzilla, monstre marin qui émerge après le naufrage de bateaux nippons détruits par des tests nucléaires sous-marins. Le film devient rapidement une œuvre culte au Japon.

De l'autre côté du Pacifique, l'accueil est plutôt froid, *Godzilla* est même censuré à sa sortie aux États-Unis. Pourtant, un an auparavant, les Américains produisaient *The Beast from 20,000 Fathoms* (Le Monstre

des temps perdus), inspiré d'une nouvelle de Ray Bradbury où une sorte de dinosaure (nommé *Rhedosaurus*) se réveille des glaces arctiques à la suite de tests nucléaires et attaque New York. Pour la première fois dans l'histoire du cinéma, un monstre naissait d'une explosion nucléaire. Notons que dans le *remake* hollywoodien de *Godzilla* réalisé par Roland Emmerich en 1998, ce sont des essais nucléaires français et non américains qui réveillent le monstre.

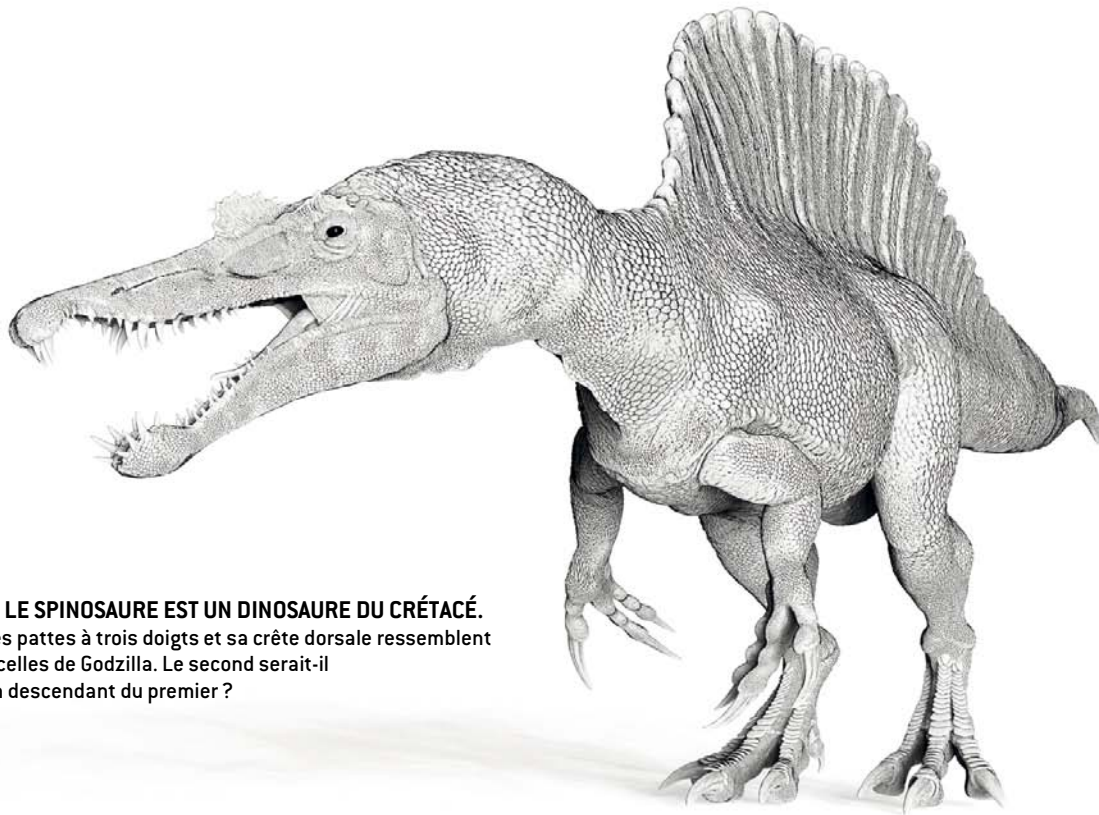
Quoi qu'il en soit, Godzilla devint vite un « mononoké » de la culture nippone, sorte de divinité de la nature qui se réveille pour punir les hommes. D'autres réalisateurs ont aussi exploité le filon : la mode des dinosaures et autres monstres géants qui envahissent les villes était lancée, et *Godzilla* devint un genre à part entière, le genre « kaiju » (« bête étrange ou mystérieuse » en japonais) dont *Pacific Rim* (Guillermo Del Toro, 2013) est le dernier avatar.

Des caractères dinosauriens ?

Qui est Godzilla, dont le nom signifie « gorille-baleine » en japonais ? Excellent plongeur, le monstre émerge des profondeurs et se déplace rapidement sous l'eau. Ses pattes sont positionnées le long des flancs tandis que tout le corps ondule, propulsé par une queue puissante comme celle des crocodiles ou des iguanes marins. Ces derniers apparaissent d'ailleurs dans le *remake*



1. DANS LE FILM *GODZILLA*, un monstre géant surgit du fond des océans et s'attaque aux villes. S'agit-il d'un dinosaure ?



2. LE SPINOSAURE EST UN DINOSAURE DU CRÉTACÉ.

Ses pattes à trois doigts et sa crête dorsale ressemblent à celles de Godzilla. Le second serait-il un descendant du premier ?

américain de 1998 pour représenter l'origine reptilienne du dinosaure mutant. Bien qu'il affiche une origine marine, Godzilla est souvent considéré comme un dinosaure. Or les dinosaures n'étaient pas des animaux aquatiques, mais des reptiles essentiellement terrestres qui se déplaçaient à l'aide de leurs pattes situées sous le corps, comme les mammifères, et non sur le côté comme chez les autres reptiles « classiques ».

Néanmoins, les oiseaux sont des dinosaures à plumes et certains, tels les manchots, sont marins : il existe bien des dinosaures aquatiques. Admettons que les deux termes ne soient pas antinomiques et que Godzilla partage quelques caractères avec des dinosaures. Quels sont ces traits communs ? Dans les films, Godzilla semble être piscivore, ce qui le rapprocherait des spinosaures, groupe de théropodes (dinosaures bipèdes généralement prédateurs) à tête de crocodile et ayant vécu du Jurassique au Crétacé (il y a entre 155 et 85 millions d'années environ). Cette appartenance au groupe des théropodes est aussi cohérente avec le fait que Godzilla laisse dans certains films des traces tridactyles (à trois doigts) sur le sol. Cependant, dans le film de 1954, des traces de la plante du pied du monstre suggèrent une locomotion plantigrade alors que les théropodes étaient digitigrades.

Essayons tout de même de trouver des caractères dinosauriens au monstre : ses épines dorsales évoquent encore celles des spinosaures. Ces derniers arboraient une

crête sur le dos soutenue par des apophyses ou épines vertébrales (*spino* signifie épine en latin). Le problème est que les épines dorsales de Godzilla sont beaucoup plus crénelées et dentelées que celles des spinosaures.

Un géant hors normes

La taille de Godzilla en fait-elle alors un dinosaure ? Le squelette de *Spinosaurus aegyptiacus*, bien que fragmentaire (les fossiles originaux ont volé en éclats lors du bombardement de Munich par les Anglais en avril 1944), aurait atteint environ 14 mètres de longueur pour 6 mètres de hauteur, ce qui en ferait un des plus gros reptiles terrestres carnivores. Mais d'autres reptiles piscivores, tel l'ichtyosaure *Shastasaurus* du Trias, pouvaient dépasser 20 mètres de longueur. Ces records restent cependant ridicules par rapport à la taille de Godzilla qui augmente au cours de l'histoire du cinéma ! Dans la version japonaise de 1954, le monstre mesure environ 50 mètres alors qu'il atteint 150 mètres dans le dernier *remake*. Ces tailles démesurées correspondent à des masses corporelles estimées variant entre 6 000 et 150 000 tonnes : dans ce cas, on s'interroge sur la capacité du monstre à se déplacer sur la terre ferme sans s'effondrer sous son propre poids... Ses os sont-ils creux comme ceux des théropodes – oiseaux compris – ou des ptérosaures (reptiles volants du Mésozoïque) ? Le souci est que des os creux ne sont guère compatibles avec le

mode de vie amphibie ou aquatique de Godzilla : la plupart des reptiles et mammifères marins présentent au contraire des os souvent très denses, permettant de lester le corps pour optimiser le temps de plongée à grande profondeur. Godzilla serait-il alors doté de sacs aériens comme les oiseaux ou les insectes volants ? Hélas, les films ne nous renseignent pas sur le sujet.

Les différents films montrent d'ailleurs l'évolution de nos connaissances en paléontologie et en biologie de l'évolution. Ainsi, dans les années 1950, l'évolution était considérée comme une succession de « chaînons manquants » et non comme un processus buissonnant et aléatoire : Godzilla était alors une « créature intermédiaire » avec une mosaïque de caractères tels un buste de gorille et un museau d'ours. Le monstre pourrait donc se rapprocher des reptiles mammaliens plutôt que des dinosaures ! Rappelons que les reptiles mammaliens, apparus au Carbonifère – bien avant les dinosaures –, ont donné naissance aux mammifères. L'un des plus connus est le dimetrodon du Permien des États-Unis (âgé d'environ 270 millions d'années), féroce carnivore, quadrupède, souvent confondu avec un dinosaure. Il présente une belle crête dorsale composée de longues épines vertébrales. N'est-ce pas aussi le cas de Godzilla ? ■

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

ART & SCIENCE

Les folles créatures de la plage

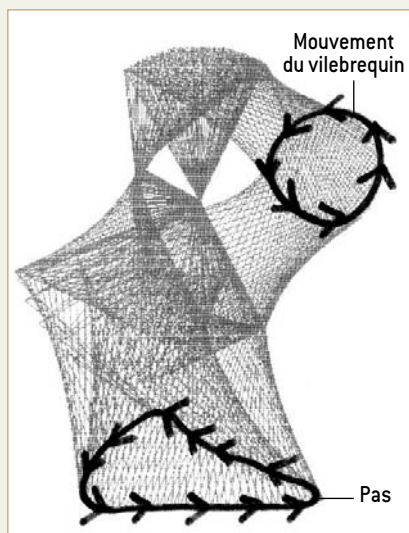
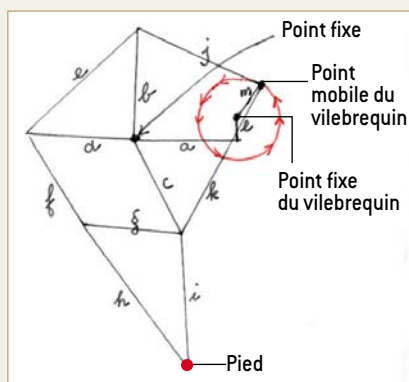
Des structures faites de tuyaux et de bouteilles en plastique arpentent les plages des Pays-Bas. Ces créatures ont été élaborées à partir d'algorithmes évolutionnistes qui imitent les principes de la sélection naturelle. Elles sont désormais exposées à Paris.

Loïc MANGIN

Jusqu'au 4 janvier 2015, les robots investissent la Cité des sciences et de l'industrie, à Paris, à l'occasion d'une exposition consacrée à l'art robotique. L'idée est de montrer des œuvres qui n'auraient jamais pu voir le jour sans un robot. Certaines sont constituées du robot lui-même, d'autres ont été créées grâce à l'intervention d'un robot qui n'apparaît pas.

Parmi les artistes invités, le sculpteur hollandais Theo Jansen est venu avec trois immenses créatures qu'il laisse d'ordinaire baguenauder en liberté sur les grandes plages de la mer du Nord : *Animaris Umerus*, *Animaris Ordis* et *Animaris Adulari* sont des sortes d'insectes géants, de plusieurs mètres de longueur, élaborés avec des tubes et des bouteilles en plastique fixés par du ruban adhésif (voir la photographie page ci-contre). Animés par le vent, ils se déplacent sur le sable à l'aide de leurs multiples pattes (voir la vidéo en lien avec le QR-code page suivante).

L'histoire de ces machines commence il y a plus de 25 ans quand T. Jansen, physicien de formation, s'intéresse à la théorie de l'évolution et au processus de sélection naturelle. Il applique ce dernier à des machines, d'abord virtuelles, qu'il met en compétition dans son ordinateur : seules celles qui se déplacent le mieux sont retenues pour subir une étape de modifications aléatoires (l'équivalent de mutations). La nouvelle population est à son tour testée, et ainsi de suite jusqu'à l'obtention d'« individus » performants. Les vainqueurs ont ensuite été construits avec



LES CRÉATURES se déplacent grâce aux mouvements de vilebrequins reliés aux pattes de la créature par plusieurs tiges en plastique (en haut). Ainsi, le mouvement circulaire est converti en un pas (en bas).

du matériel bon marché et « lâchés » dans la nature. Détaillons quelques-unes de leurs caractéristiques.

Certaines de ces créatures, qui se déplacent de façon autonome, ont en guise de poumons des bouteilles en plastique, où de l'air peut être comprimé grâce à des pompes actionnées par le vent via des ailettes en plastique. De la sorte, la machine dispose d'une réserve d'énergie pour mettre en branle ses membres, équipés de pistons qui font office de muscles. Ces pistons sont actionnés par l'air qui sort des bouteilles à travers de petits tuyaux.

Le déplacement des pattes commence par la rotation de vilebrequins (qui transforment le mouvement linéaire des pistons en un mouvement circulaire) disposés le long de l'ossature de la créature. Ce mouvement circulaire est converti en un mouvement triangulaire du pied correspondant grâce à 11 tiges en plastique (voir les figures ci-contre). Chaque fois que le pied touche le sol, il décrit une ligne horizontale et tire la structure. À l'extrémité de cette ligne, le pied se soulève pour parcourir le reste du triangle arrondi, tandis que d'autres pieds prennent la relève.

L'algorithme évolutionniste s'est ici révélée précieuse pour déterminer les longueurs de chacune des 11 tiges (de a à k sur la figure ci-contre en haut, la tige m correspondant au vilebrequin et la tige l étant accessoire). En effet, le mouvement du pied dépend beaucoup des proportions de ces