

tiques (cétacés, siréniens) qui ne conservent que deux membres transformés en rames à l'avant, ou encore des serpents et des apodes (groupe d'amphibiens peu connu) qui n'ont plus aucune patte. Si, sur Terre, aucun vertébré n'est hexapode, les « six pattes » existent pourtant : ils regroupent entre autres les insectes et les collembolles qui peuplent les sols. Avec plusieurs millions d'espèces, les hexapodes sont même les organismes les plus nombreux.

Pourquoi un vertébré terrestre ne peut-il être doté de trois paires de membres ? Parce que ses pattes sont issues de nageoires charnues de poissons osseux, transformées il y a plus de 370 millions d'années en membres munis de doigts, aussi nommés membres chirodiens. Nageoires charnues et membres chirodiens sont eux-mêmes issus des ceintures pectorale (formant l'épaule) et pelvienne (formant le bassin), à raison de deux nageoires (ou deux membres) par ceinture. Un vertébré à six pattes comme ceux de science-fiction devrait donc posséder une troisième ceinture osseuse au niveau du tronc, c'est-à-dire un segment supplémentaire.

Cela nécessiterait, au cours de l'embryogenèse, une action différente des gènes architectes (les gènes *Hox*) intervenant dans la segmentation du tronc et l'apparition des ceintures. Or l'organisation de ces gènes est bien plus complexe chez les vertébrés que chez les arthropodes, où une segmentation multiple est pourtant possible, entraînant souvent la multiplication des paires de pattes. C'est le cas des crustacés (qui ont jusqu'à dix pattes), des arachnides (huit pattes), sans oublier les scolopendres et les mille-pattes.

La présence d'un ou plusieurs membres surnuméraires est pourtant possible chez les tétrapodes, mais elle relève d'une malformation nommée polymélie. Chez l'homme, cette grave anomalie touche environ un enfant sur un million. Mais, comme chez l'ischioptère (un fœtus « absorbant » partiellement son jumeau pendant son développement *in utero*), le ou les membres surnuméraires, souvent hypertrophiés ou déformés, ne sont pas des membres fonctionnels. Ainsi, il faudrait des mutations

génétiques considérables pour obtenir un tétrapode à trois ceintures et six membres. De surcroît, une hexapodie fonctionnelle chez un vertébré nécessiterait des changements notables des systèmes musculaire et nerveux, pour coordonner ces membres surnuméraires : comment un cheval hexapode se comporterait-il au galop ?

Les robots à trois pieds

La question de la coordination de six membres est d'ailleurs d'une grande importance pour les roboticiens qui cherchent à réaliser des robots mobiles hexapodes. Chez les cyborgs humanoïdes, le déplacement reste classique : dans *Star Wars*, le général Greivous, féroce ennemi des Jedis, se



2. UN THARK, MARTIEN à six membres du film *John Carter*. Il est doté de deux paires de bras et d'une paire de jambes, ce qui n'est pas la configuration la plus stable, laquelle est celle du trépied.

déplace sur ses deux jambes, mais dispose de deux paires de bras robotiques armés de sabres laser.

Dans le domaine des transports, il y a beaucoup de roues, mais peu de pattes. En roulant sans glisser, la roue consomme peu d'énergie. Si les pattes sont moins économes, elles présentent néanmoins l'avantage de

s'adapter à de nombreux types de terrains. Les robots qui ont six pattes, plutôt que deux ou quatre, sont plus stables durant les déplacements : trois des pattes préparent le pas suivant, tandis que les trois autres stabilisent le robot. Trois pieds permettent d'être stable sur n'importe quel support, aussi irrégulier soit-il. Un tabouret à trois pieds est bien plus stable qu'une chaise à quatre pieds. Damon Knight, critique et auteur de science-fiction, l'avait bien compris : dans *Règle d'or*, une nouvelle publiée en 1954, il crée les « tripèdes », ingénieux extraterrestres hexapodes à symétrie d'ordre trois possédant trois pieds, trois bras et six yeux (voir la figure 1). Notons également que les envahisseurs de *La Guerre des mondes* (H.G. Wells, 1898), les « tripodes », se déplacent sur trois pattes, comme les Raméens si l'on en croit les héros du roman *Rendez-vous avec Rama* d'Arthur Clarke (1972).

Mais revenons aux robots : le biomimétisme est utile pour optimiser leur locomotion. Les insectes sont source d'inspiration, et l'étude de leur comportement et de leur système nerveux apporte de précieuses informations. Ainsi, la marche des insectes est gérée par deux types de contrôle nerveux : le premier commande les mouvements de chacune des pattes, tandis que le second contrôle les différentes allures par le biais des interactions des pattes voisines, les six pattes étant connectées en parallèle.

Les robots hexapodes ont d'ores et déjà montré qu'ils peuvent accomplir des tâches impossibles pour les véhicules équipés de roues. Pourtant les rovers martiens de la NASA ne sont pas encore équipés de pattes ! *Curiosity* est doté de six roues motrices dont quatre sont orientables. La suspension de ce rover et la taille de ces roues lui permettent de franchir des obstacles de 50 centimètres de hauteur ou de profondeur. Mais sa vitesse maximale n'est que de quatre centimètres par seconde... Des robots humanoïdes hexapodes rencontreront-ils un jour les martiens verts de Barsoom ? ■

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

ART & SCIENCE

Origami : de la grue aux structures de l'Univers

L'art japonais du pliage de papier entretient des liens étroits avec les mathématiques, mais aussi avec l'exploration spatiale, les airbags et même la matière noire !

Loïc MANGIN

L'origami est un art ancestral japonais, celui du pliage du papier. Il serait né en Chine et aurait conquis le pays du Soleil levant au VI^e siècle grâce à des moines bouddhistes. Il fut d'abord réservé à des cérémonies religieuses, le prix du papier à cette époque en interdisant un usage courant. Aujourd'hui, l'origami s'est démocratisé et les enfants japonais apprennent à confectionner très tôt l'une des plus célèbres figures, la grue. Cet animal symbolise la paix et une légende locale stipule que : « Quiconque plie 1 000 grues en papier verra son vœu exaucé. »

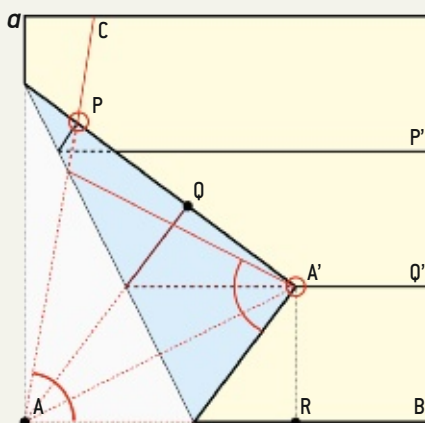
L'origami fut un art de la sculpture réservé aux élites, puis un jeu d'enfants, et est devenu un sujet d'études pour... mathématiciens ! Le point de départ de ce dialogue fructueux entre les deux disciplines fut le langage créé par Akira Yoshizawa (1911-2005) pour coder les pliages en creux, en crête... à l'aide de points, de traits et de flèches. Précisons que Yoshizawa a conçu plus de 50 000 nouveaux modèles d'origami et qu'il fut invité à exposer ses œuvres au Carrousel du Louvre en 1998. Dès lors, on disposait

d'un moyen simple pour transmettre des figures. On pouvait également appliquer des principes mathématiques à l'art du pliage pour en découvrir les lois sous-jacentes. Avant d'en détailler quelques-unes et de voir comment les mathématiques aident à concevoir des figures complexes (voir les

figures e, f, g et h page ci-contre), rappelons que les méthodes de l'origami viennent à bout de trois problèmes géométriques célèbres impossibles à résoudre avec un compas et une règle non graduée : la trisection d'un angle (voir la figure a), la quadrature du cercle et le doublement d'un cube.

Un origami est fondé sur un schéma de pliage (la figure b est celui d'une grue) qui doit obéir à quatre lois : la 2-colorabilité, c'est-à-dire que l'on peut colorier avec deux couleurs toutes les zones sans que deux régions adjacentes aient la même ; à chaque sommet, la différence entre les nombres de crêtes (en noir sur la figure b) et les creux (en marron) est égale à ± 2 ; la somme des angles pris alternativement (1+3+5 ou 2+4+6 sur la figure b) autour d'un sommet est égale à 180 degrés ; enfin, quelle que soit la façon dont s'empilent les différentes parties de la feuille, aucune d'elles ne peut traverser un pli.

Armés de ces quatre lois, abordons un problème pratique : à partir d'un modèle, par exemple un cerf-volant (le coléoptère de la figure c), comment plier une feuille carrée pour en obtenir une représentation (la figure e) ?



LA MÉTHODE DE HISASHI ABE pour la trisection de l'angle CAB. Avant de plier les feuilles, les droites PP' et QQ' sont parallèles à AB, Q et Q' étant les milieux de AP et de BP'. Quand le point P est rabattu sur la droite AC et le point A sur QQ' en A', l'angle A'AB est égal au tiers de CAB.

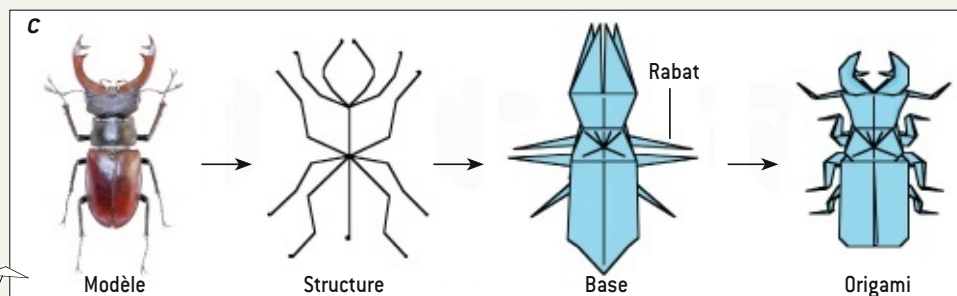
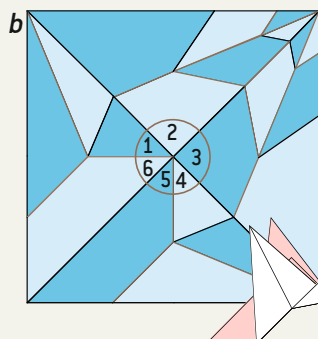
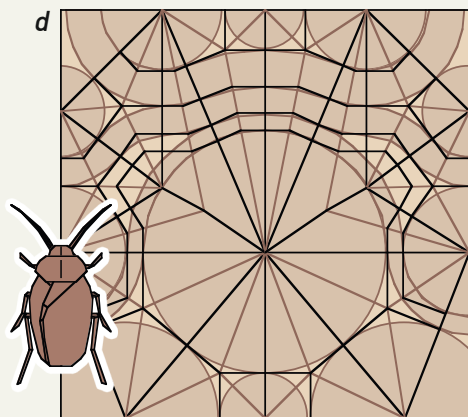


Photo : © Shutterstock/ethyalkohol



Dans les années 1990, les origamistes ont mis au jour quelques principes qui ont conduit à l'élaboration d'une sorte de mode d'emploi.

La première étape consiste à dessiner une structure en forme d'arbre dont les branches correspondent aux diverses parties du modèle, telles les pattes et les mandibules. Cette structure constitue un guide pour la construction de la base de l'origami, que l'on complexifie ensuite pour donner du réalisme au pliage (voir la figure c). Le passage de la structure à la base de l'origami est l'étape la plus complexe.

À chaque branche correspond un rabat du papier. Un tel rabat est obtenu, par exemple, à partir d'un carré que l'on plie en deux selon la diagonale, puis encore jusqu'à obtenir une « pointe » étroite et effilée qui sera une patte, un bras, une aile... Quand on déplie le papier, on constate que la partie utilisée pour le rabat est approximativement un quart de cercle situé à un coin du carré. On peut imaginer d'autres types de rabats construits à partir d'un demi-cercle ou d'un cercle entier au milieu du papier. Au final, une structure arborescente d'un origami correspond donc à une série de zones circulaires, entières ou non, disposées sur le papier.

Le problème devient celui du remplissage d'une surface avec des cercles, un problème qui a été beaucoup étudié par les mathématiciens. De leurs travaux ont émergé quelques règles grâce auxquelles on complète le pavage de cercles afin d'obtenir le schéma de plis de la base (voir la figure d). Ainsi, l'une des règles stipule que chaque centre de cercles est un sommet.



Ce protocole a bouleversé l'art de l'origami et l'on peut désormais en faire « à la demande ». Robert Lang, ancien physicien à la NASA et aujourd'hui origamiste professionnel, a conçu un logiciel nommé *TreeMaker*, téléchargeable sur Internet, qui calcule le schéma de pliage à partir de n'importe quelle structure en arbre.

Les méthodes et les principes de l'origami ne sont pas cantonnés aux sphères artistiques et mathématiques ; ils ont aussi leur place dans le monde de la technologie où les applications sont nombreuses et variées. Ainsi, en 2002, R. Lang a été sollicité par le Laboratoire *Lawrence Livermore* afin de concevoir, pour un télescope spatial, une lentille de 100 mètres de diamètre qui pourrait tenir dans le cylindre de trois mètres de diamètre du lanceur... Un prototype de cinq mètres de diamètre a d'ores et déjà confirmé la faisabilité du projet. Autres exemples : un stent (un dispositif qui maintient ouverte l'artère où il est inséré) a été conçu sur le modèle des « bombes à eau » ; un airbag peut être replié dans son réceptacle grâce aux méthodes de l'origami.

Plus étonnant, en octobre 2012, Mark Neyrinck, de l'Université Johns Hopkins, et Sergei Shandarin, de l'Université du Kansas, ont montré que l'on pouvait comparer l'agencement des grandes structures cosmiques aux plis d'une figure d'origami : cet art du papier aiderait ainsi à mieux comprendre la répartition de matière noire dans l'Univers ! ■

Le logiciel *TreeMaker* conçu par Robert Lang est téléchargeable gratuitement à l'adresse : <http://tinyurl.com/lang-treemaker>



IDÉES DE PHYSIQUE

Des frottements classés X

Mettant à profit l'électricité produite par le frottement, de petits émetteurs portables de rayons X seront bientôt disponibles.

Jean-Michel COURTY et Édouard KIERLIK

En 2008, des physiciens américains ont créé la sensation en montrant qu'un rouleau de ruban adhésif déroulé sous vide émet des rayons X au niveau de la zone de décollement. En travaillant sur ce résultat *a priori* anecdotique, ces chercheurs ont mis au point des sources de rayons X qui se révèlent utilisables en pratique : ne nécessitant pas de générateur de haute tension comme les sources classiques, elles ont l'avantage d'être aussi compactes qu'un téléphone mobile. Mais comment passe-t-on d'un simple rouleau de bande adhésive à des rayons X ?

Des rayons émis par des électrons stoppés net

Les rayons X sont des ondes électromagnétiques, dont la longueur d'onde est comprise entre un centième de nanomètre et dix nanomètres (inférieure à celle des ultraviolets). Cela correspond à des photons (de lumière non visible) d'énergie comprise entre 2×10^{-17} et 2×10^{-14} joule soit, dans des unités plus adaptées, entre 100 et 10^5 électronvolts.

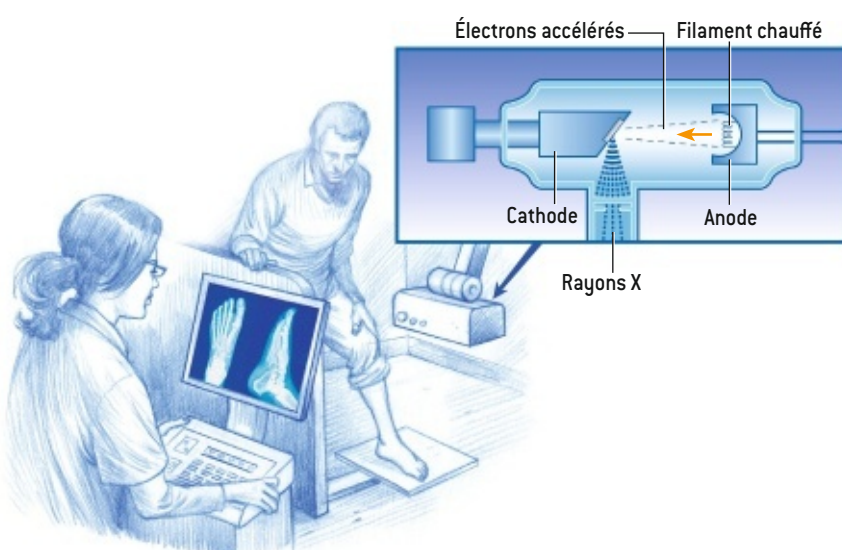
Les plus énergétiques de ces rayons (au-delà de dix kiloélectronvolts), qualifiés de X durs, peuvent traverser de grandes épaisseurs de matière, comme celle d'un corps humain ou d'un bagage. En jouant sur les différences de pouvoir d'absorption des atomes, par exemple entre ceux des tissus mous et ceux des os, on peut alors réaliser des images de la structure interne d'un objet. D'où l'utilisation des rayons X

pour les radiographies médicales ou pour les contrôles de sécurité des bagages.

Comment produire des rayons X ? Il y a émission d'ondes électromagnétiques dès que des charges électriques sont accélérées ou freinées. Pour que soient émis des rayons de petite longueur d'onde, la vitesse des charges doit varier très rapidement. C'est le cas d'électrons très énergétiques qui sont freinés, puis stoppés par de la matière : ils émettent un rayonnement caractéristique (nommé *Bremsstrahlung*, ou rayonnement de freinage) à très large spectre, auquel peut s'ajouter le rayonnement dû à la désexcitation des atomes de la cible. C'est le

principe du « tube de Coolidge », inventé il y a 100 ans et toujours largement utilisé (voir la figure 1).

Dans ce dispositif, des électrons sont émis en grand nombre par un filament de tungstène chauffé par un courant électrique. Ils sont alors accélérés par une différence de potentiel électrique : pour qu'il y ait émission de rayons X, les électrons doivent acquérir une énergie au moins équivalente à celle des photons X, d'où la nécessité d'une haute tension (quelques dizaines de kilovolts). Par ailleurs, pour que les électrons ne soient pas ralentis durant leur (lente) accélération, le vide



1. LES SOURCES CLASSIQUES DE RAYONS X sont les « tubes de Coolidge ». Dans un tel dispositif, un filament métallique chauffé par un courant émet des électrons. Ces derniers sont accélérés par une haute tension électrique entre l'anode et la cathode, et viennent frapper une surface oblique de tungstène posée sur la cathode. Le freinage brutal des électrons entraîne l'émission d'un rayonnement électromagnétique dont une bonne partie est composée de rayons X.