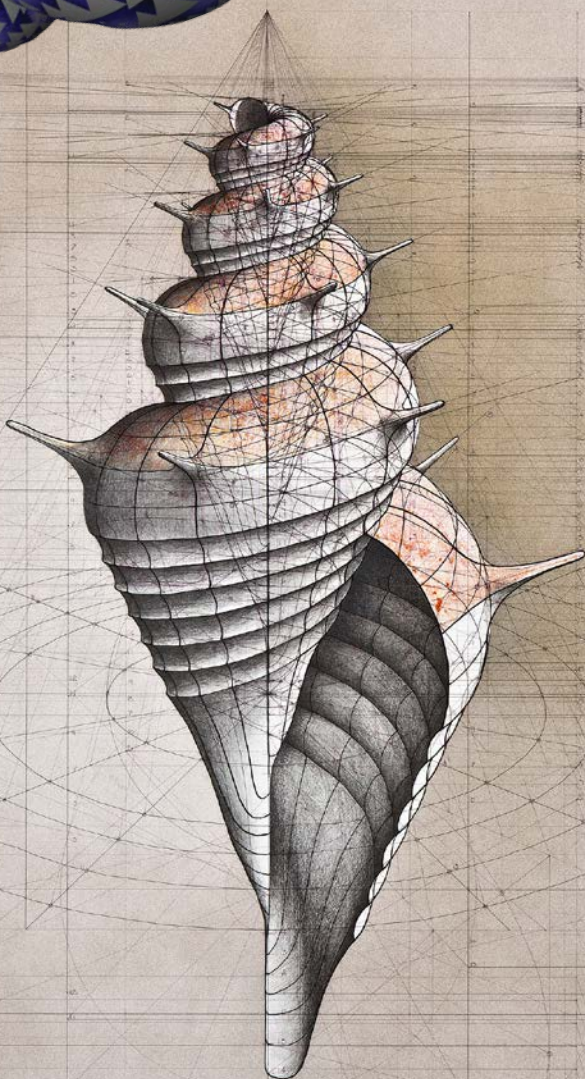
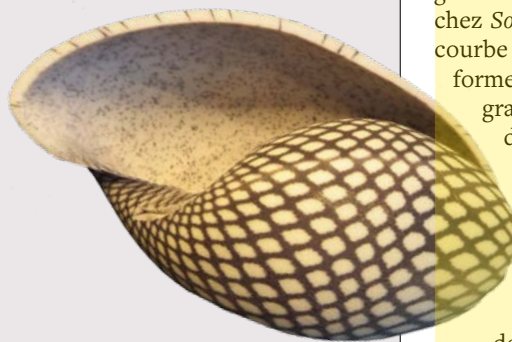


COQUILLAGES IMAGINAIRES
ET MUREX

5

Avec un programme général, Francesco De Comité a su jouer avec les paramètres pour produire des coquillages imaginaires. Toutefois, rien n'est simple dans le monde vivant et c'est vrai même dans celui, réduit,

des coquillages. Les murex et leur famille, coquillages munis d'élégantes piques, superbement dessinés par l'artiste vénézuélien Rafael Araujo, échappent au modèle élaboré actuellement.



Pour ce qui est de la forme de l'opercule, le passage suivant montre que D'Arcy Thompson avait non seulement compris le principe abstrait de la construction, mais que son   il expert de naturaliste savait identifier les paramètres qui caractérisent une espèce de coquillage:

« La courbe génératrice [de l'opercule] adopte des formes très variées. Elle est circulaire chez *Scalaria*, *Cyclostoma* et *Spirula*; on peut la considérer comme une portion de cercle chez *Natica* ou *Planorbis*. Elle est triangulaire chez *Conus* ou *Thatcheria*, et rhomboïde chez *Solarium* ou *Potamides*. Très souvent, la courbe génératrice adopte plus ou moins la forme d'une ellipse: chez *Oliva* et *Cypraea*, le grand axe de l'ellipse est parallèle à celui de la coquille; [...] et dans de nombreux cas bien document  s, tels que *Stomatella*, *Lamellaria*, *Sigaretus haliotoides* et *Haliotis*, le grand axe de l'ellipse est oblique par rapport à celui de la coquille. Cette courbe génératrice devient presque une demi-ellipse chez *Nautilus pompilius* et un peu plus qu'une demi-ellipse chez *Nautilus umbilicatus*, le grand axe étant dans les deux cas perpendiculaire à l'axe de la coquille. La forme de la courbe ne se prête que rarement à une expression mathématique simple. [...] Chez certaines ammonites, celles du groupe '*Cordati*', [...] la courbe génératrice correspond presque exactement à une cardioïde d'équation $r = a(1 + \cos \theta)$. »

DIFFICULTÉS INFORMATIQUES
ET DESSINS DE SURFACE

Pour disposer d'une définition mathématique que l'imprimante 3D comprenne, il faut non seulement s'occuper de définir la surface externe du coquillage, mais aussi sa surface interne, qui est du même type. Il faut lier les deux surfaces en opérant de telle manière que le volume délimité soit sans trou, jamais trop fin et n'exigeant pas une précision dans les détails supérieure à celle fournie par l'imprimante.

Cette construction du volume demande donc un travail qui ne se réduit pas à écrire les formules proposées par l'analyse géométrique décrite dans l'encadré 2. En utilisant une méthode classique, Francesco De Comité obtient la solution en transformant les surfaces en un très grand nombre de triangles attachés, triangles qui lui sont aussi utiles pour colorier la surface. La taille du programme, une fois débarrassé des commentaires et réduit à l'essentiel, est de 4000 caractères (ou octets), soit une grande page environ.

Au-delà de la forme des coquillages, qui est assez bien maîtrisée, un second défi se présente au modélisateur, celui des motifs colorés à la surface des coquillages.

BIBLIOGRAPHIE

F. De Comité, **Modelling seashells shapes and pigmentation patterns : Experiments with 3D printing**, *Proceedings of Bridges 2017 : Mathematics, Art, Music, Architecture, Education, Culture*, Tessellations Publishing, 2017.

P. Chossat, **Des équations pour de bons motifs**, *Dossier Pour la Science* n° 91, avril-juin 2016.

Y. Bouligand, **D'Arcy Thompson et la logique des formes**, *Dossier Pour la Science* n° 44, juil.-sept. 2004.

H. Meinhardt, **The Algorithmic Beauty of Sea Shells**, Springer (4^e éd.), 2009.

D. W. Thompson, **Forme et croissance**, Seuil/Éditions du CNRS, 1994.

S. Wolfram, **Cellular automata as models of complexity**, *Nature*, vol. 311, pp. 419-424, 1985.

A. Turing, **The chemical basis of morphogenesis**, *Phil. Trans. B.*, vol. 237, pp. 37-72, 1952.

H. Moseley, **On the geometrical forms of turbinated and discoid shells**, *Phil. Trans. R. Soc. Lond.*, vol. 128, pp. 351-370, 1838.

Une première méthode pour les reproduire consiste à les capter par un procédé photographique et à les plaquer à la surface des coquilles artificielles que l'on programme. Cela donnera bien sûr d'assez bons résultats, mais il s'agit d'une forme de tricherie qui ne permettra pas d'obtenir un court modèle mathématique, puisqu'il faut beaucoup d'informations pour mémoriser l'image, copiée pixel par pixel, de la surface d'un vrai coquillage.

Heureusement, des procédés plus satisfaisants semblent possibles. Ils se fondent sur l'idée que la coquille provient des tranches d'opercule qui se construisent successivement. Le rayon s'accroît et ces tranches sont colorées selon des règles simples, qui déterminent la coloration de chaque nouvelle tranche en fonction des précédentes. Le plus souvent, la couleur d'un point de la tranche $n+1$ se déduit de celle du point de la tranche n situé au même endroit et de ses voisins. Parfois, pour déterminer le motif de la tranche $n+1$, il sera utile d'utiliser les motifs de plusieurs tranches antérieures à la tranche n .

Les Britanniques Conrad Waddington et Russell Cowe ont adopté cette hypothèse dès 1969, suivis en 1984 par leur compatriote Stephen Wolfram, le célèbre créateur du logiciel de calcul formel Mathematica. Ils ont supposé que les points étaient colorés en respectant les règles d'un automate cellulaire unidimensionnel. Ce type de mécanismes, imaginé par le mathématicien d'origine hongroise John von Neumann dans les années 1940, est le plus simple qu'on puisse concevoir pour définir des interactions déterministes entre objets discrets (voir l'encadré 3).

L'hypothèse des automates cellulaires, qui, pour un informaticien, est la plus facile à programmer, ne semble cependant pas s'appuyer sur des considérations biologiques précises. Au moins à titre d'essai, elle méritait d'être explorée et ce qu'elle donne ressemble vaguement à ce que l'on observe dans la nature. L'une des raisons de ce succès limité est que l'on utilise souvent les automates cellulaires avec deux couleurs, ce qui est insuffisant pour reproduire avec précision la complexité des pigmentations des coquillages.

Une hypothèse plus proche de la biologie s'inspire de la vision que le mathématicien britannique Alan Turing a développée dans les dernières années de sa vie pour décrire des modèles mathématiques de la morphogenèse. Adoptée par les biologistes allemands Hans Meinhardt et Martin Klingler, elle a été reprise par Francesco de Comité.

L'idée est celle d'une activation à courte distance combinée à une inhibition plus prolongée déterminées par deux substances, un activateur et un inhibiteur. La concentration de chacune d'elles dépend de leurs concentrations

en chaque point dans les étapes précédentes de la construction. Le modèle est continu et s'exprime par des équations aux dérivées partielles (équations différentielles où les fonctions dépendent de plusieurs variables).

Voici un exemple de ces équations.

$$\frac{\partial a}{\partial t} = s \left(\frac{a^2}{b} + b_a \right) - r_a a + D_a \frac{\partial^2 a}{\partial x^2}$$

$$\frac{\partial b}{\partial t} = s a^2 - r_b b + D_b \frac{\partial^2 b}{\partial x^2} + b_b$$

Sans entrer dans les détails, indiquons que $a(x, t)$ et $b(x, t)$ sont les concentrations de l'activateur a et de l'inhibiteur b . Elles dépendent du temps t et de la position x de la zone colorée sur le contour de l'opercule, assimilé à une courbe. Les coefficients D_a et D_b sont les paramètres de diffusion; plus leur valeur est élevée, plus la diffusion des substances est rapide. Les coefficients r_a et r_b caractérisent les vitesses de décroissance des concentrations a et b (pour d'autres précisions, voir le magnifique livre de Hans Meinhardt, *The Algorithmic Beauty of Sea Shells*, Springer, 2009, page 23).

JEUX ESTHÉTIQUES ET NOUVEAUX DÉFIS

Après avoir cherché à imiter au mieux la réalité du monde biologique et en avoir découvert et exploité certains des secrets pour fabriquer des formes qui en imitent les créatures, il est amusant de jouer avec le modèle obtenu. On produit alors des formes aussi belles que les vraies, mais qui n'existent pas dans la nature (voir l'encadré 5).

Cependant, la nature, qui n'a pas joué à fabriquer tous ces pseudo-coquillages que la maîtrise acquise permet de créer, a exploré d'autres voies plus complexes... qui échappent aujourd'hui aux modélisateurs. En particulier, les coquillages de la famille des *Muricidae* (dont fait partie le genre *Murex*), utilisés depuis l'Antiquité pour extraire la pourpre, présentent des piques régulières.

Ces structures qui échappent au modèle mathématique général utilisé pour les autres coquillages exigent des compléments et provoqueront sans doute une complication des programmes actuels. Francesco de Comité réfléchit à la façon dont on pourrait franchir l'obstacle créé par ces exceptionnels et récalcitrants coquillages. S'il réussit, ne croyons pas que le travail de modélisation du réel touchera alors à sa fin: le monde du vivant ne se limite pas aux coquillages et son inventivité ne se laissera pas réduire facilement à quelques formules mathématiques, quels que soient le soin et l'intelligence que nous y consacrerons. ■

L'AUTEUR



LOÏC MANGIN
rédacteur en chef adjoint
à *Pour la Science*

LE MONDE DANS UN SAVON

Parmi les nombreuses propositions à la croisée de l'art et de la science présentées lors de l'événement *Nous ne sommes pas le nombre que nous croyons être*, il était un savon qui avait beaucoup à raconter...

D

u 2 au 3 février, la Cité internationale des arts, à Paris, a résonné des pas d'un public nombreux venu arpenter les multiples espaces de l'institution. À quoi ont-ils assisté? À *Nous ne sommes pas le nombre que nous croyons être*, un foisonnement d'expériences inédites où se sont côtoyés artistes, scientifiques et penseurs pendant... 36 heures d'affilée! À l'initiative de l'événement, on trouve la fondation Daniel et Nina Carasso, en partenariat avec la chaire Arts & science portée par l'École polytechnique et l'École nationale

supérieure des arts décoratifs. Selon Jean-Marc Chomaz et Samuel Bianchini, professeurs respectivement dans ces deux établissements, il s'agissait de «voir la science comme un espace de création et l'art comme un espace de recherche scientifique».

Le fil conducteur du programme était *Les Quatre Vents du désir*, un recueil de nouvelles de science-fiction publié en 1982 par l'Américaine Ursula K. Le Guin, décédée en janvier 2018. Pourquoi de la science-fiction en guise de source d'inspiration? Pour imaginer des mondes de demain vraisemblables à travers ateliers, conférences, expositions... Mélanie Bouteloup, commissaire de l'événement, précise que le parti pris était, «plutôt que de proposer des projets finis, de les exposer au milieu de leur processus de création».

Attardons-nous sur l'une des propositions, le projet *Carved to flow*, que l'on doit à Otobong Nkanga, une artiste et

performeuse nigériane. Il s'inscrit dans la continuité du même projet montré lors de la documenta 14, organisée en 2017 à Kassel, en Allemagne, comme tous les cinq ans, mais aussi cette fois à Athènes, en Grèce. À Paris, était présentée *Germination*, la troisième étape du projet, après *Le Laboratoire* et *L'Entrepôt et la distribution*, nous verrons pourquoi.

Le point de départ est un savon noir nommé *o8 Black Stone*, élaboré à Athènes avec la maîtresse savonnière Evi Lachana. Il est composé de charbon de bois, qui lui donne sa couleur, et de sept corps gras (huile d'olive, de laurier, de sauge, de cacao, de karité...) provenant de diverses régions du Moyen-Orient, d'Afrique du Nord et de l'Ouest, nécessaires à sa fabrication (voir la photo de la recette page ci-contre). L'ambition de l'artiste est de révéler le tissu de relations et les liens économiques qui unissent les matières premières et les objets manufacturés.