



SOUS LA CALOTTE DE GLACE d'une planète, un océan pourrait héberger de drôles de formes de vie comme cet étrange «poisson» bioluminescent : cette espèce imaginaire est inspirée de la faune abyssale connue sur Terre.

présence de steppes et donc que la glaciation de Hoth ne serait que partielle. Cette question s'applique aussi à la Terre boule de glace.

Autre remarque sur les tauntauns : ces herbivores ont le sang chaud. En effet, pour éviter que Luke Skywalker ne tombe en hypothermie et ne meure de froid, Han Solo, alors pris dans un blizzard, sacrifie sa monture et glisse son ami dans la dépouille encore chaude en attendant les secours.

Avec de tels êtres évoquant des mammifères, la faune de Hoth rappelle plutôt celle de la dernière glaciation terrestre (il y a entre 110 000 et 10 000 ans) où des rhinocéros laineux côtoyaient des mammoths, et où des chasseurs-cueilleurs pouvaient joindre à pied l'Eurasie et l'Amérique du Nord grâce à une calotte glaciaire qui recouvrait alors toute une partie de l'hémisphère Nord.

Les animaux de la planète Hoth, avec leur sang chaud et leur fourrure, semblent donc bien adaptés aux températures extrêmes. Ce n'est pas forcément le cas des monstres peuplant d'autres planètes glacées de la science-fiction : ainsi, dans le film *Star Trek* de J. J. Abrams (2009), James Kirk se retrouve sur la très froide planète Delta Vega. Il devient vite la proie d'un énorme prédateur amphibie qui transperce la glace et le pourchasse avec ses longues pattes. On peut se demander comment ce monstre à peau nue est capable de supporter des températures aussi basses, que ce soit dans l'eau ou sur la banquise. Une réponse possible est que l'activité métabolique

produit de la chaleur, dégagée dans le volume du corps et évacuée par la surface. Comme le volume augmente avec la taille plus vite que la surface, un animal de grande taille peut avoir une température interne supérieure à l'extérieure. Ce phénomène est envisagé pour certains grands dinosaures et nommé «homéothermie de masse» ; mais il est difficilement compatible avec les longues excroissances mobiles du monstre de Delta Vega.

Un corps glacé bien réel

Le Système solaire contient plusieurs corps glacés, comme Europe, une lune de Jupiter dont la température de surface avoisine -150°C . Environ quatre fois plus petit que la Terre, ce satellite est entièrement recouvert d'une croûte de glace dont l'épaisseur est estimée à quelques dizaines de kilomètres. Cette calotte glaciaire couvrirait un océan liquide profond d'environ 90 kilomètres. De nombreux indices confirment l'hypothèse d'eau liquide. En surface, la glace striée et craquelée présente de nombreuses lignes, sortes de dépressions rectilignes interprétées comme des fossés d'effondrement. Ces structures témoigneraient d'une «tectonique» glaciaire importante et active, comme c'est le cas de la banquise terrestre qui bouge sur l'océan. Par ailleurs, des geysers d'eau ont été récemment détectés sur Europe. On retrouve une structure similaire sur Encelade, une lune de Saturne.

Comme ces deux satellites sont petits, l'eau n'atteindrait pas une pression suffisante pour devenir solide en profondeur. Le fond de l'océan serait alors en contact avec un manteau silicaté. À cette interface, une chimie complexe pourrait se développer, renforçant l'espoir – loin d'être confirmé – que des formes de vie dites extrémophiles, comparables à celles que l'on trouve dans les dorsales océaniques terrestres ou dans les lacs subglaciaires d'Antarctique, pourraient apparaître. Pour bon nombre d'exobiologistes, Europe et Encelade sont les meilleurs candidats à la présence de vie dans le Système solaire. Un nouveau programme rassemblant les agences spatiales européenne, américaine, japonaise et russe, est envisagé à l'horizon de 2020 pour explorer les lunes glacées de Jupiter. La dernière sonde en date ayant visité Jupiter et ses satellites est *Galileo*, restée en orbite autour de la géante gazeuse entre 1995 et 2003.

Et si les premiers êtres extraterrestres n'étaient pas les Martiens mais les Européens ? La science-fiction s'est, bien sûr, déjà emparée de la question : dans le récent *Europa Report*, film de l'Équatorien Sebastián Cordero (2013), les survivants d'une mission internationale explorant l'océan subglaciaire du satellite font une terrible découverte...

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

ART & SCIENCE

Algorithmes psychédéliques

Grâce aux théories d'Alan Turing sur la morphogenèse, l'Australien Jonathan McCabe crée des œuvres spectaculaires qui évoquent, entre autres, des intérieurs de cellules.

Loïc MANGIN

En 1952, Alan Turing publiait un article intitulé *The chemical basis of morphogenesis* [Les Fondements chimiques de la morphogenèse]. Il y proposait des mécanismes de formation de motifs et de formes chez les animaux et les plantes à partir d'une simple équation, celle dite de réaction-diffusion. Schématiquement, des substances diffusent dans un milieu et interagissent via des réactions d'inhibition et d'activation. Les rayures du tigre, les taches de la girafe, les motifs des coquillages, la disposition des feuilles sur une tige et même la formation des doigts s'expliqueraient par le modèle de Turing.

Les biologistes ne sont pas les seuls à avoir exploité ses vertus. Physiciens et géologues se le sont également approprié, mais aussi les artistes. C'est le cas de Jonathan McCabe, qui vit à Canberra, en Australie. Ses œuvres, qui ressemblent à des coupes tissulaires, à des intérieurs de cellules ou à des motifs iridescents dont sont parés poissons et lézards (voir la page ci-contre), sont forgées à l'aide des équations de Turing.

Cette technique relève de l'art dit génératif. De quoi s'agit-il ? Pour s'en revendiquer, l'artiste doit utiliser un système autonome qui, en dehors de toute intervention humaine, « décide » d'une œuvre ou au moins de cer-

taines de ses composantes. Le système est souvent un algorithme informatique (c'est le cas pour J. McCabe), mais des artistes utilisent des processus biologiques, des contraintes mathématiques, des robots...

Des fugues de Bach, les *Cut-up* de William Burroughs (un texte est découpé et réarrangé), les ouvrages du mouvement Dada et de l'Oulipo sont autant d'exemples d'art génératif.

J. McCabe a remplacé les cellules des êtres vivants par des pixels dont la couleur est définie par le programme qu'il a mis au point. De la même façon que les réactions chimiques dans une cellule influent sur celles des voisines, l'état d'un pixel dépend de celui de son environnement.

Les premières œuvres de l'Australien étaient simples, en noir et blanc. Puis, en superposant (virtuellement) les processus de Turing, il a obtenu des motifs complexes, multi-échelles, où de larges bandes constituées de petits points coexistent avec des tourbillons multicolores. Lorsqu'un motif – au départ imprévisible – lui plaît, J. McCabe ajoute parfois un algorithme supplémentaire, dit génétique, pour obtenir des variations sur un même thème. ■

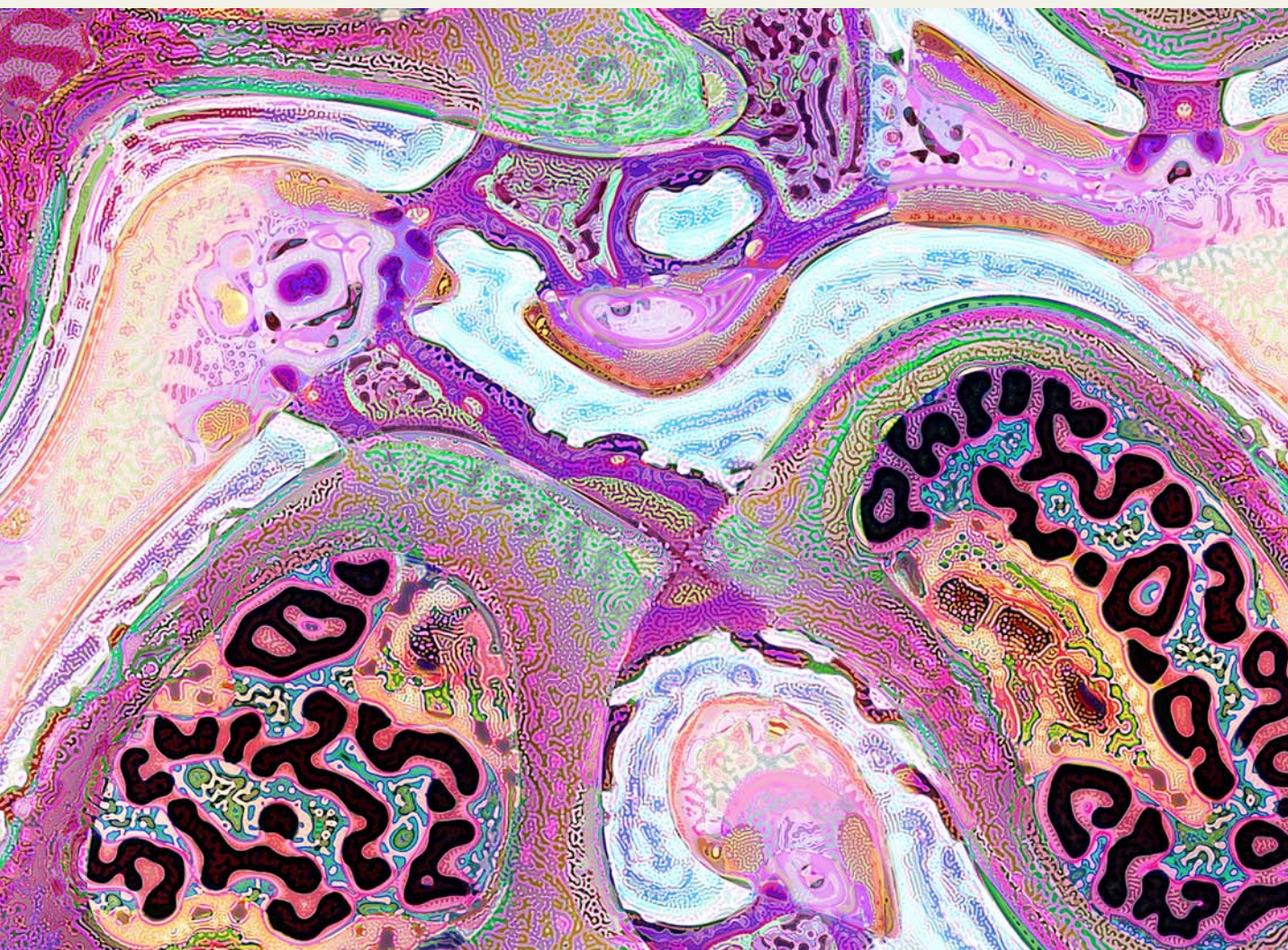
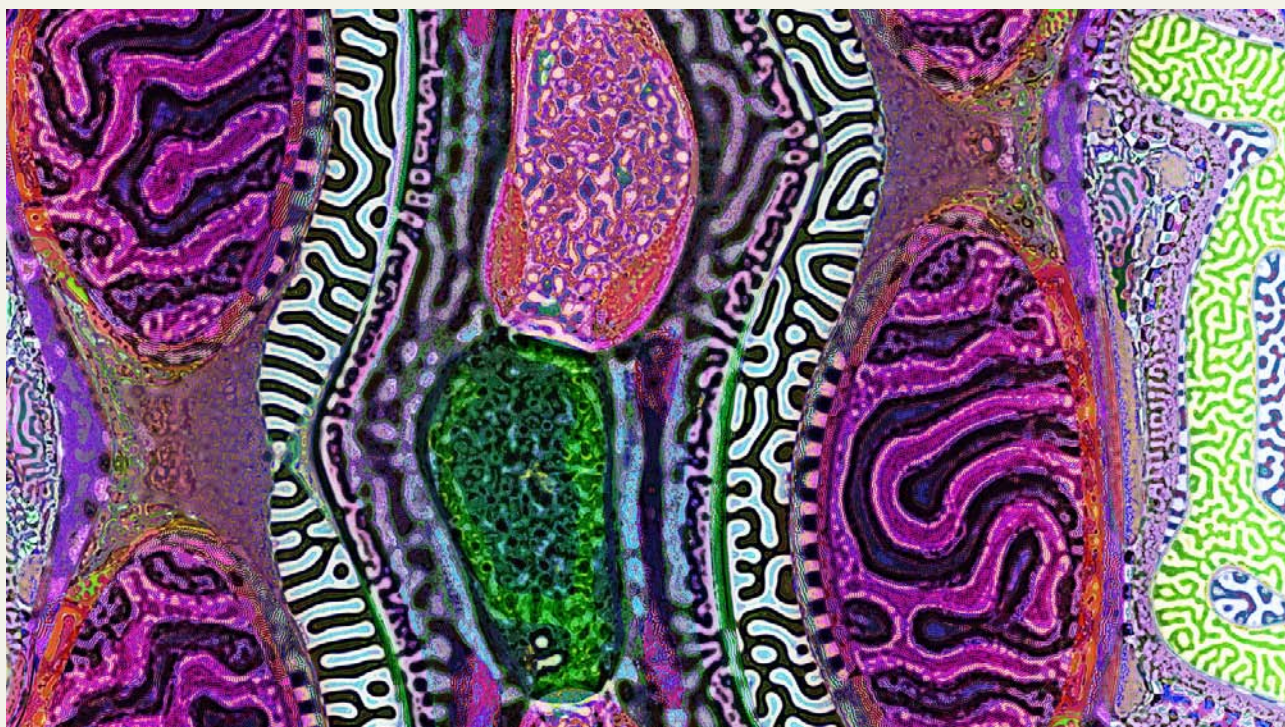
J. McCormack et al., *Ten questions concerning generative computer art*, *Leonardo*, vol. 47, n° 2, pp. 135-141, 2014.

Œuvres de J. McCabe : <http://bit.ly/PLS-McCabe>

Des fugues de Bach, les *Cut-up* de Burroughs, les textes Dada et de l'Oulipo... sont autant d'exemples d'art génératif.



© J. McCabe



IDÉES DE PHYSIQUE

Des frites sous haute tension

L'application de puissantes impulsions de champ électrique à des pommes de terre facilite la découpe des frites et améliore leur cuisson.

Jean-Michel COURTY et Édouard KIERLIK

Des frites ou des chips moins grasses et de bel aspect, même après décongélation ? Depuis plusieurs années, l'industrie agroalimentaire a inclus dans les chaînes de production de ces aliments une étape où la pomme de terre est soumise à des hautes tensions. En appliquant un champ électrique adéquat, on peut en effet fragiliser ou détruire des cellules, et ainsi modifier les propriétés du matériau biologique. L'effet biophysique en jeu est nommé électroporation. En quoi consiste-t-il et quels sont ses atouts ?

pas étonnante. En raison de l'agitation thermique des molécules, des trous dans la membrane peuvent se former spontanément, même en l'absence de champ ; mais ils sont minuscules (de l'ordre du nanomètre) et se referment très vite (à l'échelle de la nanoseconde). Par quel mécanisme le champ électrique les ouvre-t-il davantage et les stabilise-t-il ?

En fait, la question n'est pas totalement élucidée. Selon l'interprétation dominante, le champ électrique modifierait la différence de potentiel de part et d'autre de la membrane : il chargerait, grâce aux ions

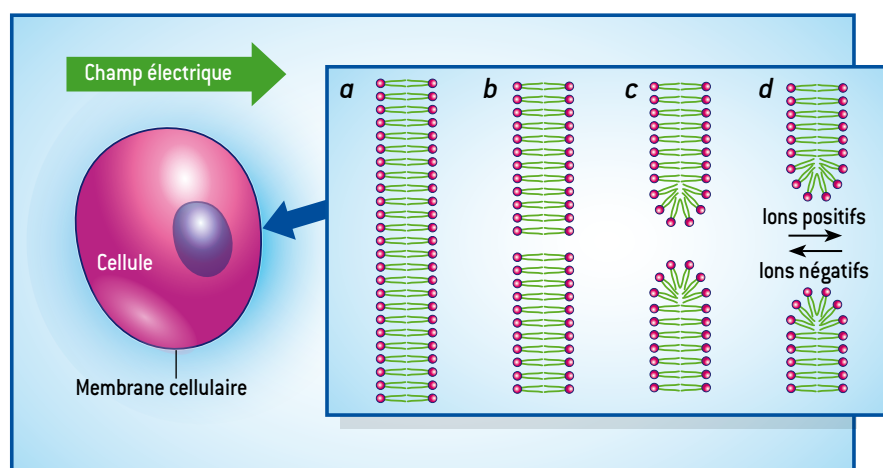
présents, les deux « armatures » de cette dernière et augmenterait ainsi la force qui réunit les deux couches lipidiques. Selon ce schéma, il s'ensuit une pression, d'origine électrostatique, qui amincit la membrane au point que cette dernière se déchire lorsque la surtension atteint une valeur de l'ordre du volt.

Une autre explication, qui n'est pas exclusive de la première, est que, à partir d'une certaine taille du pore, les molécules de la membrane se réorientent spontanément de façon à présenter leurs « têtes » face au milieu aqueux, situation énergétiquement

Des trous dans les cellules

Examinons ce qui se passe quand une cellule vivante est soumise à un champ électrique intense. La membrane cellulaire est constituée principalement d'une double couche de molécules lipidiques de quelques nanomètres d'épaisseur, qui sépare le milieu intracellulaire de son environnement (voir la figure 1). Cette bicouche se comporte comme un condensateur électrique chargé sous une tension de l'ordre de 0,1 volt ; ce « potentiel transmembranaire » est dû à un léger déséquilibre de la concentration des ions de part et d'autre de la membrane. Quand la membrane est soumise à un champ électrique suffisamment intense, elle « claque » : elle devient conductrice et perméable.

Ce claquage est dû à la formation de pores. En soi, la présence de pores n'est



1. LA MEMBRANE QUI DÉLIMITE une cellule biologique est formée d'une double couche de molécules lipidiques ayant une « tête » (en rose) hydrophile et une « queue » (en vert) hydrophobe (a). De minuscules ouvertures naissent spontanément sous l'effet de l'agitation thermique (b). Si le pore est de taille suffisante, les molécules de la bicouche adoptent autour de lui une configuration énergétiquement plus favorable (c). Un canal est ainsi formé, où peuvent passer des ions et des molécules d'eau. Un champ électrique intense favorise cette circulation, ce qui stabilise le pore et l'agrandit de façon irréversible (d).

Dessins de Bruno Vacaro