

évolution par variation peut se dérouler. Comment exprimer cette condition sur la puissance du système génétique ?

La notion de constructeur est la solution. On va exiger qu'une large classe de configurations puissent être produites par la machinerie de notre configuration autoreproductrice quand on en change le ruban génétique.

La configuration autoreproductrice de von Neumann satisfait cette exigence nouvelle. Quelle que soit la configuration *C* (prise dans une large classe de configurations), il y a un génome *G* qui, quand on le présente à la machinerie, produit *C*. La boucle de Langton n'a pas cette propriété ; ainsi, elle est certes plus simple que la configuration de von Neumann, mais ne modélise pas convenablement l'autoréplication des êtres vivants évolués.

Signalons aussi qu'une façon d'obliger les automates autoreproducteurs à n'être pas trop simples, ce que von Neumann ne perd jamais de vue, est d'exiger qu'ils soient capables de mener tout calcul réalisable par ordinateur. Il ne semble pas que cette fonctionnalité doive être prise en compte systématiquement quand on cherche à modéliser l'autoreproduction des êtres vivants, puisqu'on sait bien qu'ils n'ont pas cette capacité de tout calculer.

Dans le monde réel, tout n'est pas génétiquement productible par n'importe quelle cellule vivante utilisée comme machinerie de synthèse. Si l'on souhaite construire des modèles fidèles aux schémas logiques de la vie, il faut donc imposer des conditions de constructibilité larges, mais raisonnables, et ne considérer les conditions de calculabilité que comme des options facultatives. En adoptant une telle attitude, il semble bien que nous soyons arrivés à une notion satisfaisante, qui rend compte du vivant et du type d'autoréplication à l'œuvre.

Le modèle auquel nous sommes arrivés de ce qu'est un être autoreproducteur du type des êtres vivants est pertinent, mais sous une forme moins mathématique qu'on pouvait l'espérer. Ce défaut résulte de l'imprécision sur la classe des configurations que la machinerie d'un être autoreproducteur doit être capable de fabriquer et de l'imprécision sur le type de complexité que doit

posséder le système. Von Neumann n'a proposé ni l'automate *trivial*, ni le *Replicator*, ni les boucles de Langton, car il voulait un modèle assez proche du modèle observé en biologie et qui permet l'évolution dès qu'un mécanisme aléatoire de modification des génomes est ajouté.

Le fait qu'il ait réussi à élaborer un tel système autoreproducteur dans l'univers des automates cellulaires prouve que, sur un plan logique, le type d'autoreproduction observé dans le monde vivant n'est pas miraculeux. Cette preuve directe que le modèle génétique de la vie peut s'appuyer sur une physique discrète et relativement simple est une grande avancée.

Notons que, si les boucles de Langton ne sont pas des structures autoreproductrices du type de celles recherchées par von Neumann, elles ont cependant inspiré de nouvelles recherches qui ont abouti à des simplifications de la machinerie de von Neumann. C'est le cas des boucles de Gianluca Tempesti, un peu plus compliquées que celles de Langton (148 cellules contre 86), mais qui ont une capacité de construction assez générale. D'autres modèles, comme le *EvoLoop* de Hiroki Sayama, conduisent à une famille de boucles autoreproductrices de tailles et de formes variées, en même temps qu'à un processus de compétition entre ces boucles. Dans un univers très simplifié d'automates cellulaires, on assiste alors à des dynamiques ressemblant assez fidèlement dans leurs principes logiques à celles qu'on voit dans le monde vivant et dont il est certain qu'elles auraient enchanté von Neumann (voir la figure 5).

Galilée et Newton ont montré que si les lois physiques sont comme ils les ont formulées, alors les planètes n'ont pas besoin que Dieu s'occupe d'elles à chaque instant. De même, von Neumann a montré que la vie n'a pas besoin d'un miracle continu pour fonctionner et que le type d'autoreproduction qu'elle pratique s'obtient simplement en respectant le schéma génétique et en autorisant l'évolution. Son travail met un terme définitif aux arguments de type vitaliste qui affirmaient que la vie est trop complexe pour être réduite à de la physique. ■



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

✓ BIBLIOGRAPHIE

A. Trevorrow et T. Rokicki, *Golly*, [programme et configurations permettant d'exécuter les systèmes autoreproducteurs mentionnés dans l'article] 2011 : <http://golly.sourceforge.net/>

M. Holzer et M. Kutrib, *Cellular automata and the quest for non trivial artificial self-reproduction*, dans *Membrane Computing*, Lecture Notes in Computer Science n° 6501, pp. 19-36, Springer, 2011.

R. Freitas et R. Markle, *Kinematic Self-Reproduction Machines*, Landes Bioscience, 2004.

D. Mange et A. Stauffer, *Sur la piste des machines autorépliquantes*, *Pour la Science* n° 323, pp. 62-68, septembre 2004.

B. McMullin, John von Neumann and the evolutionary growth of complexity : looking backwards, looking forwards, *Artificial Life*, vol. 6(4), pp. 347-361, 2000.

C. Langton, *Self-reproduction in cellular automata*, *Physica D*, vol. 10, pp. 135-144, 1984.

J. von Neumann, *Theory of Self-Reproducing Automata*, University of Illinois Press, 1966.

 ART & SCIENCE

Léonard et la formule de l'arbre

Léonard de Vinci avait identifié une règle portant sur les diamètres des branches d'un arbre. Des modèles numériques la valident et montrent qu'elle correspond à la meilleure résistance au vent.

Loïc MANGIN

Léonard de Vinci a toujours eu le souci du réalisme dans ses œuvres. C'est notamment le cas des arbres qui semblent plus vrais que nature, par exemple dans *L'Adoration des Mages*, conservée à Florence, ou dans différents dessins (*voir la figure page ci-contre*). Pour parvenir à ce degré de réalisme, il s'est nourri d'observations qui l'ont conduit à formuler une hypothèse. On peut la lire dans *Les carnets de Léonard de Vinci* (*page ci-contre, des croquis sont présentés dans les cartouches*) : les branches d'un arbre, à quelque hauteur que ce soit, ont, quand elles sont rassemblées, la même section que le tronc. En d'autres termes, quand une branche de diamètre D se subdivise en N branches secondaires de diamètres d_i (i varie de 1 à N), la relation suivante est vérifiée : $\pi D^2/4 = \pi d_1^2/4 + \pi d_2^2/4 \dots + \pi d_N^2/4$. De façon plus concise, on peut écrire $D^\Delta = \sum d_i^\Delta$ pour i variant de 1 à N et, ici, $\Delta=2$.

Cette règle, dite de Léonard, est utilisée dans la plupart des programmes informatiques lorsqu'il s'agit de représenter un arbre réaliste. Pour autant, cette règle empirique est-elle vérifiée ? Peu de spécialistes s'y sont intéressés, mais parmi ceux qui ont testé l'hypothèse de Léonard de Vinci, le plus célèbre est le mathématicien français Benoît Mandelbrot. En compilant les quelques études disponibles, il a montré que, pour de nombreuses espèces d'arbres, l'exposant Δ est légèrement inférieur à 2. Les observations donnent donc raison à Léonard de Vinci. Toutefois, qu'exprime la valeur de cet exposant ? Hasard évolutif ou loi physique ?

Dans les années 1960 et 1970, deux modèles ont été élaborés pour rendre compte

de la règle. Le premier postule que les arbres sont des faisceaux de vaisseaux identiques courant des racines aux feuilles. Dans ce cas, les branches secondaires résulteraient d'une division du bouquet de vaisseaux de la branche mère. La règle de Léonard devient alors une évidence, puisqu'il y aurait autant de vaisseaux, de diamètre identique, avant et après la bifurcation.

Le second modèle est fondé sur l'idée que, dans un arbre, la déflexion d'une branche secondaire par rapport à sa branche mère,

Le diamètre des branches est une conséquence de l'adaptation de l'arbre au vent.

sous l'effet de son propre poids (et donc de son diamètre), est identique du tronc aux plus fines brindilles. Toutefois, ces deux modèles résistent mal à l'analyse. Par exemple, dans les grosses branches et le tronc, seuls cinq pour cent de la section d'une branche sont dévolus aux vaisseaux conducteurs de sève, et non la totalité comme le suppose le premier modèle. Le second n'est étayé par aucun argument évolutionniste.

Christophe Eloy, de l'Université d'Aix-Marseille, propose une autre explication, de nature structurelle. Selon le physicien, la clef de la règle de Léonard réside dans la résistance de l'arbre au vent. Pour le montrer, il a tenté, dans une sorte de processus d'ingénierie inverse, de construire

une structure arborescente avec le moins de matière possible (on suppose que l'arbre économise ses ressources) et qui résiste le mieux au vent. D'abord, cette structure doit être fractale, avec une dimension comprise entre 2 et 3, ce qui correspond à ce que les botanistes connaissent de l'architecture des arbres. Elle s'explique par la nécessité de capter le maximum de lumière avec le minimum de matière. Cette nature fractale impose les longueurs de chaque branche. Le physicien a également supposé que la résistance à la rupture par le vent est uniforme dans tout le végétal.

Ce modèle d'arbre a ensuite été soumis à un vent virtuel de façon à tester sa résistance. Ce souffle crée des forces de traînée sur chaque branche et entraîne, au-delà d'un seuil, leur rupture. Pour un vent donné, la seule variable était l'épaisseur des branches que l'on a modifiée afin d'obtenir l'arbre le plus robuste. Au final, on retrouve bien la règle que Léonard avait déduite de ses observations ! Le diamètre des branches est une conséquence de l'adaptation de l'arbre au vent.

Ce phénomène de croissance adaptée aux contraintes mécaniques est nommé thigmomorphogenèse par les botanistes. Les arbres dissymétriques qui poussent dans des régions où le vent est unidirectionnel et fréquent, notamment en bord de mer, en sont de bons exemples. Comme le soutenait Léonard de Vinci : « Dans la nature, tout a toujours une raison. » ■

Ch. Eloy, *Leonardo's rule, self-similarity and wind-induced stress in trees*, *Physical Review Letters*, à paraître, 2011.



© Bettmann/CORBIS

IDÉES DE PHYSIQUE

Bien glisser sur la neige

Pour réduire les frottements, il faut adapter à l'état de la neige la rigidité des skis, leurs semelles et leur fartage.

Jean-Michel COURTY et Édouard KIERLIK

Pour améliorer les performances des skieurs de compétition, notamment les vitesses atteintes, les équipes sportives attachent un grand soin à la préparation de la semelle du ski. En fonction de la température, de l'état de la neige, de l'humidité ambiante, etc. les experts choisissent l'état de surface plus ou moins lisse qu'ils vont donner à la semelle du ski et la nature du fart dont ils vont l'enduire pour mieux glisser. Un savoir-faire qui peut utilement s'appuyer sur une connaissance de la physique mise en jeu.

Pour le débutant, tenir sur des skis est périlleux : il a le sentiment qu'ils glissent sur la neige au moindre déséquilibre. Le frottement sur de la neige sèche est un frottement solide, proportionnel à la force perpendiculaire exercée par les skis sur le sol, soit le poids du skieur pour une piste horizontale. Aux faibles vitesses, le coefficient de proportionnalité est de l'ordre de 0,04, c'est-à-dire 20 fois inférieur à celui du contact d'un chausson d'escalade sur de la roche !

Bien que faible, ce frottement est plus important que la force de traînée aérodynamique qui s'exerce sur le skieur aux vitesses modérées. Prenons l'exemple d'un skieur de 75 kilogrammes et mesurant 1,80 mètre, en tenue de compétition. Le produit du coefficient de traînée par la surface frontale vaut, d'après les mesures, 0,65 mètre carré lorsque le skieur est debout, et 0,23 mètre carré lorsqu'il est en position de l'œuf. Cela signifie qu'à une vitesse de dix mètres par seconde, la force de traînée aérody-

namique, proportionnelle au carré de la vitesse, varie de 15 à 40 newtons selon la position adoptée. La force de frottement solide approche alors les 30 newtons, valeur comparable à celle de la traînée à dix mètres par seconde. Quand la neige est humide, le frottement est plus élevé et domine la traînée jusqu'à une vitesse de 20 mètres par seconde.

Skis souples ou non, selon la neige

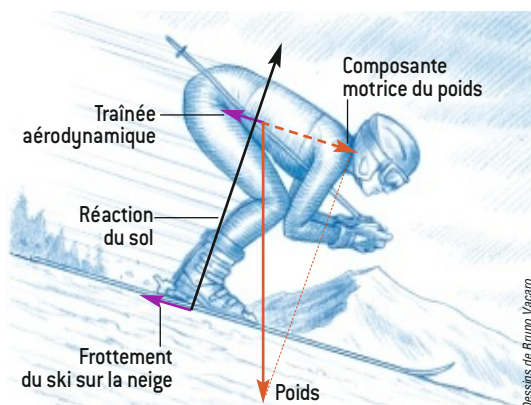
Réduire le frottement est donc un enjeu sportif considérable. Pour ce faire, il ne faut pas oublier le remodelage macroscopique de la neige soumise à la pression du ski, notamment lorsque cette neige est peu compacte. Car la formation d'un sillon est à l'origine d'un ralentissement : compaction

de la neige par le ski, déplacement, voire éjection, de la neige sont autant de sources de dissipation d'énergie qui agissent comme une force de frottement.

Le skieur peut toutefois s'en accommoder en choisissant bien ses skis. Pour une neige tendre, il prendra des skis souples, qui n'exercent qu'une faible pression à l'avant et à l'arrière. Cela permet de réduire la résistance due à l'impact du ski (car l'avant du ski ne s'enfonce pas sous la neige) et à la compaction de la neige. En revanche, pour une neige dure et compacte, il chaussera plutôt des skis rigides.

Pour aller plus loin, il faut se demander pourquoi un ski glisse sur la neige. Le mécanisme principal a été proposé en 1939 par Philip Bowden et T. Hughes, deux physiciens de Cambridge. Le frottement du ski dégage de la chaleur qui fait fondre la neige et il se forme un film d'eau d'épaisseur micrométrique qui lubrifie le contact entre la neige et le ski. Il s'ensuit un coefficient de frottement peu élevé, mais dont la valeur précise dépend de l'épaisseur du film liquide. Si cette épaisseur est très faible, le contact sera de nature solide/solide sans lubrification. Le frottement sec provient alors de la déformation, de la fracture et du fléchissement des aspérités des deux surfaces en contact.

Si l'une des surfaces est beaucoup plus dure que l'autre, les aspérités « dures » vont se frayer un chemin à travers le matériau « mou », ce qui accroît le frottement. Il convient alors d'adapter la dureté de la semelle du ski à celle de la neige : ni trop dure, ni trop souple.



1. LE SKIEUR EST FREINÉ PAR DEUX FORCES : la force de traînée aérodynamique, c'est-à-dire la résistance de l'air, et la force due au frottement du ski sur la neige. La traînée aérodynamique est proportionnelle au carré de la vitesse, la force de frottement est proportionnelle à la composante du poids perpendiculaire à la surface de contact. Les intensités de ces deux forces sont souvent comparables.

Dessiné de Bruno Vacaro