

Si les difficultés du calcul avec l'ADN se confirment en même temps que les succès du stockage moléculaire de données, nous serons en mesure d'affirmer que l'électronique est le meilleur moyen de faire rapidement du calcul (qu'on pourra encore pousser plus loin avec des méthodes quantiques), mais que pour le stockage, ce qu'a mis au point la nature est plus économique, plus robuste et capable de stocker plus massivement l'information que nous souhaitons préserver pour de longues périodes.

Des cellules vivantes programmées

Mentionnons un autre type d'exploit dans le domaine du calcul biologique. Il vient d'être réalisé par une équipe de chercheurs réunis autour de Nathaniel Roquet, du MIT, et ouvre la perspective de programmer à volonté des cellules vivantes (et non plus de soupes moléculaires en bouteille) qui deviendraient des automates à notre service et seraient aussi complexes qu'on le souhaite.

Les cellules vivantes exécutent des sortes de programmes qui, en fonction de leur identité et des signaux chimiques qui leur parviennent, les font réagir de manière spécifique, par exemple en envoyant d'autres signaux chimiques dans la cellule ou à l'extérieur. Jusqu'à présent, on ne savait ni simuler ni reproduire ces réseaux de régulation avec des programmes génétiques artificiels qui, à l'opposé de ceux envisagés par Leonard Adleman, n'ont pas pour objectif un calcul combinatoire ou abstrait, mais une réaction particulière programmée, qui produit une interaction déterminée au sein de la cellule ou avec d'autres cellules. La compréhension et la mise au point de circuits artificiels internes aux cellules qui reconnaissent des entrées successives arrivant dans un ordre fixé et qui répondent spécifiquement semblaient difficilement atteignables. On sait maintenant que c'est possible.

La méthode conçue a pour effet de créer biologiquement des machines à états : la cellule programmée se met dans un état qui est déterminé par la série d'informations qu'elle reçoit et dont l'ordre importe. Ces machines à états biologiques s'appuient sur

des enzymes nommées recombinaisons. Quand une recombinaison est activée par un signal chimique, elle enlève ou inverse un segment particulier d'ADN situé entre deux portions de séquences qui délimitent le segment et qui sont spécifiques à la recombinaison. La séquence (retirée ou inversée) peut contenir des sites de reconnaissance pour d'autres recombinaisons qui pourront alors répondre à d'autres signaux chimiques.

Après avoir créé de tels circuits qui enregistrent des événements, les chercheurs ont incorporé des gènes dans le réseau des séquences manipulées. Dans ces circuits, l'ADN se réorganise, ce qui non seulement enregistre des informations, mais détermine l'activité des gènes, ces derniers étant activés ou désactivés selon les signaux reçus. Les chercheurs ont testé cette approche avec des gènes qui codent pour différentes protéines fluorescentes. Les cellules qui contiennent le circuit artificiel auront par exemple la propriété de présenter une fluorescence rouge si elles reçoivent le signal A puis le signal B, alors que si elles reçoivent le signal B puis le signal A, elles présenteront une fluorescence bleue.

Un ordinateur-univers en perpétuelle reprogrammation

La biologie est une science où le calcul et l'information jouent des rôles centraux. Aujourd'hui, on progresse encore et au lieu d'être simplement les spectateurs de ces calculs et mémorisations d'informations que la vie opère pour fonctionner et se perpétuer, nous apprenons à utiliser et à programmer nous-mêmes des mécanismes moléculaires de traitement de l'information pour en faire ce qui nous arrange.

C'est merveilleux, et cela donne de nouveaux arguments à ceux qui voient dans l'Univers un grand ordinateur : les organismes vivants constitueraient des lieux où s'effectueraient des calculs particulièrement intenses, et leur évolution s'interpréterait comme un perfectionnement de l'ordinateur-univers, qui se reprogrammerait constamment.

■ L'AUTEUR



J.-P. DELAHAYE
est professeur
émérite
à l'université
de Lille
et chercheur

au Centre de recherche
en informatique, signal
et automatique de Lille (CRISTAL).

■ BIBLIOGRAPHIE

N. Roquet *et al.*, **Synthetic recombinaison-based state machines in living cells**, *Science*, vol. 353, 22 juillet 2016.

A. Extance, **How DNA could store all the world's data**, *Nature*, vol. 537, pp. 22-24, 2016.

J. Bornholt *et al.*, **A DNA-based archival storage system**, *Proceedings of the 21st International Conference on Architectural Support for Programming Languages and Operating Systems*, ACM, 2016.

V. Zhirnov *et al.*, **Nucleic acid memory**, *Nature Materials*, vol. 15, pp. 366-370, 2016.

V. Zhirnov et Ralph Cavin III, **Microsystems for Bioelectronics**, William Andrew, 2^e éd., 2016.

Y. Benenson *et al.*, **An autonomous molecular computer for logical control of gene expression**, *Nature*, vol. 429, pp. 423-429, 2004.



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

SCIENCE & FICTION

Glapum'tien, de quelle espèce es-tu ?

Pour répondre à cette question, les naturalistes du XIX^e siècle auraient chassé cet être imaginaire de la bande dessinée pour en prélever un spécimen et le décrire. Mais il est bien plus enrichissant de l'observer dans son environnement...

Jean-Sébastien STEYER et Roland LEHOUCQ. Illustration : Marc BOULAY

Dans les œuvres de fiction, les extraterrestres intelligents sont souvent des humanoïdes qui nous ressemblent. Cet anthropocentrisme persistant passe sous silence les nombreuses autres espèces bien réelles – cétagés, insectes, céphalopodes ou autres – qui présentent elles aussi des formes d'intelligence. Mais heureusement, il existe parfois des exceptions qui confirment la règle, comme c'est le cas des Glapum'tiens.

Les Glapum'tiens sont des extraterrestres de l'univers de « Valérian et Laureline », série de bandes dessinées de Pierre Christin et Jean-Claude Mézières dont la première publication date de 1967 (et dont l'album *L'Ambassadeur des ombres* est en cours d'adaptation au cinéma par Luc Besson). Cette saga narre, dans un futur lointain, les aventures trépidantes de deux agents spatiotemporels censés défendre les intérêts de l'« Empire Terrien » dans l'univers.

Dans l'album *Les Spectres d'Inverloch* (1984), Valérian est envoyé sur la planète Glapum't, où il a pour mission de capturer un Glapum'tien. Notons que le qualificatif de « Glapum'tien » suggère que, à l'image du mot « Terrien » que nous utilisons pour nous qualifier, l'espèce est dominante sur la planète en question. Sur Glapum't, magnifique planète bleue aux paysages côtiers et aux îles inondées par de grandes marées, Valérian fait preuve d'ingéniosité pour capturer à contrecœur un sympathique Glapum'tien : « Je ne suis ni zoologue ni collectionneur [...] et j'ai horreur de chasser

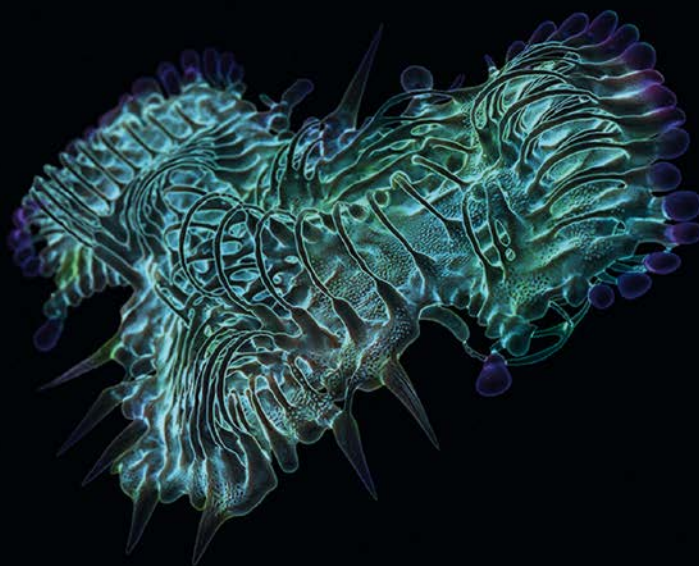


AVEC SA HAUTE STATURE ET SA PEAU BLEUE, le Glapum'tien, l'un des personnages de la bande dessinée *Les Spectres d'Inverloch*, ne passe pas inaperçu sur la couverture de l'album.

l'autochtone pour rapporter des spécimens, même en état de marche. » Cette phrase évoque très justement les naturalistes des siècles derniers qui tuaient les animaux afin de les prélever, au lieu de les observer ou de les étudier directement dans leur environnement naturel. Dans l'album suivant, intitulé *Les Foudres d'Hypsis* (1985), le Glapum'tien en question devient l'ami de Laureline et Valérian, qu'ils prénomment Ralph.

Ralph est un être sensible et intelligent, haut de plus de deux mètres, à grande tête plate en forme de dôme et aux petits yeux malins. Il est doté de quatre tentacules souples et élastiques et d'une longue queue puissante et robuste. Comme les céphalopodes, il n'a pas de cou ; ses membres sont directement situés sous la tête. Mais comme les tétrapodes (vertébrés munis de pattes), Ralph a des doigts. S'agit-il donc d'un mollusque (céphalopode) ou d'un vertébré (tétrapode) ? La réponse est donnée dans *Les Habitants du Ciel – Atlas cosmique de Valérian et Laureline* (1991), sorte d'encyclopédie illustrée, publiée par les auteurs et qui décrit avec grande précision les principales formes de vie rencontrées dans la saga. Verdict : les Glapum'tiens sont des mammifères. Certes, mais lesquels ? Observons Ralph dans son environnement pour en savoir plus.

Ralph est un excellent nageur qui se déplace aussi sur la terre ferme à l'aide de ses membres chiridiens (munis de doigts). Il est alors soit bipède, soit quadrupède. À l'arrêt, la souplesse de ses tentacules ainsi



LE PLANCTON (illustré ici) est un mets apprécié du Glapum'tien. L'alimentation est un élément important pour comprendre le mode de vie et les spécificités d'une espèce animale, même imaginaire.

que la masse *a priori* imposante de sa tête l'obligent à utiliser sa puissante queue comme support. On retrouve cette posture « à trois pattes » chez les kangourous. Ralph serait-il alors un marsupial ? Non, car il ne présente pas cette poche caractéristique du groupe, qui permet aux nouveau-nés de terminer leur développement en milieu extra-utérin.

Les Glapum'tiens présentent, au niveau de la gorge, d'étranges replis cutanés longitudinaux qui semblent directement inspirés des sillons gulaires des rorquals et autres baleines. Ces plis cutanés (au nombre de 12 à 100 selon les espèces de cétacés) s'étendent du menton jusqu'au nombril parfois, et permettent à l'animal d'ouvrir grand la gueule afin d'engouffrer des tonnes d'eau qu'ils filtrent pour se nourrir.

Ces caractères communs correspondent-ils à des traits dérivés (des synapomorphies, en terminologie technique) qui témoigneraient d'une étroite parenté, ou s'agit-il plutôt de simples ressemblances (des homoplasies) ? Notons tout de même que les Glapum'tiens ont quatre membres, à la différence des cétacés ou des siréniens (dugons et lamantins) qui n'en ont que deux. La plupart des mammifères aquatiques ou semi-aquatiques à quatre pattes sont des pinnipèdes (otaries, phoques et morses), des hippopotames, des loutres et des castors. Les deux derniers sont munis d'une queue robuste, mais la comparaison s'arrête là, car le fait d'avoir quatre pattes et une queue n'est pas forcément un caractère dérivé au sein des mammifères.

La physiologie des Glapum'tiens est également intéressante : ils sont capables de plonger longtemps et assez profond en eau froide, et même d'arpenter la surface d'une planète sans atmosphère ! Or comme tous les mammifères, ils sont munis de poumons. Ces extraterrestres sont donc des champions de la plongée en apnée, comme c'est le cas du grand cachalot dont le record enregistré est une plongée de près deux heures jusqu'à 3 000 mètres de fond !

Un savant mélange de cétacé et de monotrème

Les Glapum'tiens sont donc de surprenants extrémophiles : pour lutter contre le froid de l'espace et des océans, ils ont peut-être une épaisse couche de graisse sous la peau. Et pour économiser leur oxygène, ils ralentissent sans doute leur métabolisme grâce à leur hémoglobine de forme particulière (comme chez les manchots). À moins qu'ils n'aient un taux élevé de myoglobine, autre protéine qui stocke l'oxygène dans le sang (comme chez les cétacés). Disposent-ils également d'un filet capillaire (nommé *retia mirabilia*), qui optimise l'apport en oxygène des organes vitaux (cerveau, cœur ou pattes) comme c'est encore une fois le cas chez les cétacés ou les pinnipèdes ?

Cet extraterrestre est décidément une intéressante chimère qui concentre des traits hérités de plusieurs groupes à la fois ! C'est aussi valable pour sa denture et son régime alimentaire : la grande bouche de Ralph cache

des dents très plates, allongées et identiques en haut et en bas de la mâchoire (les spécialistes parlent d'homodontie). Sur leur planète d'origine, ces dents plutôt broyeuses font des Glapum'tiens des durophages voraces, mangeurs de coquillages, un peu comme les raies actuelles ou les placodontes – reptiles qui vivaient le long des côtes il y a 210 millions d'années environ. Sur Terre, les Glapum'tiens deviennent omnivores : ils apprécient aussi bien les plantes coriaces que le zooplancton. Leurs grosses dents plates doivent donc aussi faire office de filtres, un peu à la manière des fanons des baleines.

Mais si les Glapum'tiens partagent de nombreux caractères avec les cétacés, leur mode de reproduction clôt définitivement le débat : ces mammifères pondent des œufs ! Déposés en eau peu profonde, ils grossissent en même temps que l'embryon. Une fois mature, l'œuf forme une île qui héberge aussi l'adulte. Sur Terre, il existe des mammifères ovipares (ou monotrèmes) : les échidnés et l'ornithorynque. Les premiers évoquent des hérissons munis d'un long museau et d'une queue courte. Ils ne ressemblent donc pas aux Glapum'tiens. En revanche, l'ornithorynque est bien un mammifère amphibie et ovipare, comme Ralph ! Valérien avait raison : il ne suffit pas d'échantillonner un être vivant pour le comprendre, il est indispensable de l'observer dans son milieu naturel. ■

Jean-Sébastien STEYER est paléontologue au CNRS-MNHN, à Paris. Roland LEHOUCQ est astrophysicien au CEA, à Saclay. Marc BOULAY est sculpteur numérique.

ART & SCIENCE

Les errances du jeune Werner

Au musée de Minéralogie de l'École des mines, à Paris, le portrait d'un géologue rend hommage à ses travaux et à ses idées, notamment par la représentation de deux échantillons de roches. L'un d'eux est bien réel et est exposé dans le musée.

Loïc MANGIN

L'École des mines, à Paris, abrite un musée de minéralogie riche de 100 000 échantillons – 4 000 sont exposés – qui constituent un précieux inventaire de la diversité géologique de notre planète. Dans la grande galerie, si d'aventure vous levez les yeux au-dessus des vitrines, votre regard rencontrera celui d'Abraham Gottlob Werner (1749-1817), doctement installé en son tableau (*voir la page ci-contre*). Dans cette toile, plusieurs histoires se superposent : celle de l'œuvre elle-même, celle du personnage et celle des roches représentées.

Le tableau s'inscrit dans une série de portraits d'éminents géologues sollicitée dans les années 1850, sans doute pour décorer une galerie. Outre Werner, les honorés sont Jean-Baptiste Romé de L'Isle, Déodat Gratet de Dolomieu, Ferdinand de Saussure, Balthazar Georges Sage et un autre acteur de nos histoires, René Just Haüy.

Le portrait de Werner, endommagé, a failli être jeté dans les années 1990. Redécouvert en 2012 par Didier Nectoux, le conservateur du musée, sa restauration fut prise en charge par ABC Mines, l'association des Amis de la bibliothèque et des collections du musée de minéralogie. Werner était sauvé ! Mais qui était-il ?

Géologue et minéralogiste renommé, Werner fut professeur à l'École des mines de Freiberg, à l'ouest de l'Allemagne, en Saxe. Il s'illustra par la description de nombreux minéraux et surtout par la défense du neptunisme.

Cette théorie stipulait que dans un océan primordial recouvrant la planète, toutes les espèces minérales se seraient formées à partir des sédiments, par précipitation. Puis les eaux se seraient retirées, laissant émerger les continents. On doit aussi à Werner une classification des roches fondée sur leurs propriétés naturelles, telles la dureté.

Le Français Haüy (1743-1822), premier conservateur des collections à l'École des mines de Paris, où il fut professeur, était son grand rival. Ils s'affrontèrent à travers une correspondance pas toujours marquée par l'amabilité. Haüy était un partisan du

Werner et Haüy se sont opposés à travers une correspondance pas toujours marquée par l'amabilité

plutonisme, théorie opposée au neptunisme et selon laquelle la Terre était à sa naissance un immense magma. En outre, il développa lui aussi une classification fondée, elle, sur l'idée de « molécule intégrante », qui préfigurerait celle de maille cristallographique, et ce bien avant la mise au point des techniques modernes d'analyse, au XX^e siècle.

Revenons au tableau, que l'on doit à Constant Pellenc. Que voit-on ? Werner, à l'instar de ses collègues également portraiturés, est mis en scène avec des éléments signifiants. Un globe terrestre évoque sans doute le neptunisme (les continents sont

peu marqués). Sur un chevalet, un tableau noir orné d'un schéma en blanc illustre l'idée d'enseignement. Sur la table, vraisemblablement en malachite, on distingue le *Traité des caractères des minéraux*, la traduction française d'un des ouvrages de Werner. Et puis, il y a ces deux cailloux...

L'identification de celui qu'il tient à la main est délicate, faute d'information. Il s'agit probablement d'une fluorine. En revanche, aucun doute n'est permis pour celui posé sur la table, car le vrai échantillon est dans les collections du musée de minéralogie ! C'est une granodiorite (de la famille des granites) traversée de deux filons orthogonaux de feldspaths. Or il s'agit d'une roche plutonique, c'est-à-dire d'origine magmatique. Au départ, un fluide magmatique homogène cristallise et refroidit. Ce faisant, des fissures se forment et se remplissent de fluides résiduels qui cristallisent à leur tour. Ici, le filon le plus étroit est antérieur, car il a été traversé par le plus large, comme en attestent les liserés sombres (*flèches rouges dans la photo*).

Pourquoi ces deux roches ? On peut émettre une hypothèse. L'aspect stratifié de la fluorine, que Werner privilégie en la tenant, symboliserait la sédimentation au cœur du neptunisme, tandis que la roche plutonique est à l'écart. Lors de votre prochaine visite au musée de minéralogie, amusez-vous à analyser les portraits des autres géologues ! ■

Musée de Minéralogie de l'École des mines de Paris : www.musee.mines-paristech.fr/