

vivants et d'objets. Lorsqu'il se demande par exemple si la longueur des nuits sur la Lune ne s'oppose pas à la sagesse divine, Wilkins répond qu'on observe la même chose aux Pôles terrestres.

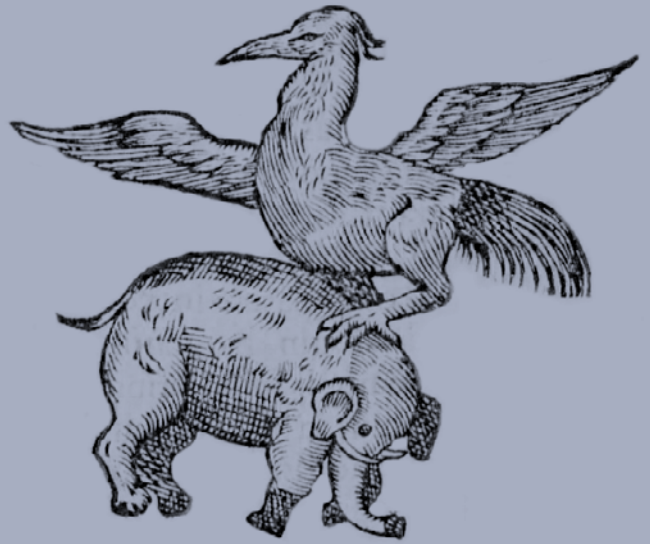
Mais la comparaison entre Nouveau Monde et Monde dans la Lune resterait incomplète si elle ne prenait pas en compte la dimension du voyage à travers le vaste océan ou, dans le cas de la Lune, à travers l'espace. Au XVII^e siècle, la lunette astronomique est considérée comme un moyen de transport et le grossissement équivalait au voyage. Toutefois, la vision reste limitée et personne n'a encore rapporté d'objets lunaires ni fait d'observation directe. Les réalités lunaires restent inaccessibles et, pour Wilkins, il faudrait se rendre sur place.

Six mois de voyage à vol d'oiseau

Mais comment atteindre notre satellite ? Wilkins établit un rapide calcul : sachant que la Lune est éloignée de la Terre de 52 demi-diamètres terrestres, si l'homme se déplaçait en ligne droite sans s'arrêter avec une vitesse de 68 kilomètres par heure, le voyage durerait au moins six mois. Complicé, certes, mais pas impossible. Peut-être qu'un oiseau pourrait nous transporter ou que nous pourrions construire une machine.

Ses idées se précisent au fil des ans. Loin d'être jugé irréalisable ou farfelu, le vol humain intéresse d'autres savants tels que le Français Pierre Gassendi ou l'Italien Francesco Lana. Dans les années 1650, le savant anglais Robert Hooke se joint à Wilkins pour l'aider dans ses recherches. Il est peut-être trop difficile de se rendre sur la Lune, mais tous deux ne désespèrent pas de s'élever au moins au-dessus du sol, en attendant mieux. Wilkins imagine des machines volantes ou encore des ailes attachées au corps. Les bras des hommes n'étant pas assez puissants, le plus simple serait d'utiliser les jambes, plus fortes et moins sujettes à la fatigue. Pour cela, il faudrait créer une machine dans laquelle les ailes seraient reliées aux jambes. L'homme pousserait alors sur chaque pied, l'un après l'autre, comme s'il grimpait, et chaque mouvement de jambe ferait bouger les deux ailes en même temps. Il pense aussi à une machine plus grande, qui accueillerait plusieurs hommes et transporterait

SOULEVER UN ÉLÉPHANT est un jeu d'enfant pour le Ruck. Apparu dans la littérature persane et arabe du Moyen Âge, cet oiseau géant y est présenté comme un rapace immense, doté d'une force extraordinaire et vivant sur une île de l'océan Indien occidental. L'oiseau soulève sans difficulté rhinocéros et éléphants pour les donner comme nourriture à ses petits. Pour certains auteurs, il est réel. Pour d'autres, tel Ulisse Aldrovandi dans son *Ornithologiae* [1599, *ci-contre*], c'est un animal fabuleux. Dans son ouvrage, John Wilkins propose de chevaucher l'animal jusqu'à la Lune.



des vivres et des objets pour le commerce avec les habitants lunaires.

Ainsi, en Angleterre et dans l'Europe savante, Wilkins devient une source d'inspiration pour plusieurs auteurs. Certains étendent le raisonnement à d'autres planètes, d'autres l'utilisent en théologie naturelle pour souligner la puissance créatrice de Dieu, d'autres s'en servent pour présenter de nouvelles réflexions naturalistes, tel Charles Morton, qui décrit la Lune comme un monde accueillant les oiseaux terrestres lors de la mauvaise saison.

À la fin du XVII^e siècle, de nouveaux ouvrages, tels les *Entretiens sur la pluralité des mondes* de Bernard Le Bouyer de Fontenelle, éclipsent l'œuvre de Wilkins en banalisant l'idée d'un monde lunaire. Pourtant, la cohérence de son discours mérite que l'on s'y arrête. En choisissant d'étudier ce sujet, Wilkins savait qu'il ne pourrait apporter de preuves, mais il souhaitait malgré tout se positionner dans le domaine de la science. Influencé par le développement du scepticisme dans l'affrontement religieux entre protestants et catholiques, mais aussi par le renouveau du scepticisme dans les sciences, Wilkins a nuancé son propos. En présentant chaque proposition, en éliminant les fausses et en évaluant les probabilités des autres, il a ménagé son lecteur. Son message n'était pas que la Lune est habitée, mais qu'il est fort probable qu'elle le soit. Et en multipliant les marques d'incertitudes, il a certes affaibli son idée, mais il l'a rendue recevable par le plus grand nombre, même par ceux qui ne partageaient pas sa conviction. ■

■ BIBLIOGRAPHIE

C. Bouyre, *Le vivant dans le discours sur la pluralité des Mondes. L'exemple de l'œuvre de John Wilkins (1614-1672)*, Thèse, 2015 : <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01236074>

J. Wilkins, *The Discovery of a World in the Moone*, 1638 : <https://archive.org/details/discoveryofworld00wilk>

J. Wilkins, *A Discourse Concerning a New World & Another Planet*, 1640.

A. Ross, *The New Planet no Planet*, 1646.

■ À ÉCOUTER

Le jeudi 10 mars 2016, de 16h à 17h, Claire Bouyre reviendra sur le plaidoyer de John Wilkins en faveur d'une Lune habitée dans la partie *Actualité* de l'émission *La marche des sciences*, sur *France Culture*. www.franceculture.com

Vie ou intelligence : comment en repérer les traces ?

Les erreurs commises à propos de l'identification de traces de vie ou d'intelligence font comprendre pourquoi il est important de savoir mesurer la complexité.

Jean-Paul DELAHAYE

Il semble naturel de distinguer trois catégories de structures sur Terre et dans l'Univers :

– les structures physiques (galaxies, rochers, fleuves, molécules d'eau, étoiles, trous noirs, cristaux, planètes, atomes d'hydrogène, glaciers, dunes...);

– les structures vivantes ou provenant d'organismes vivants (arbres, cellules, alvéoles des ruches d'abeilles, organes, biominaux, neurones, réseaux sanguins, chromosomes, protéines, squelettes d'homnides, paramécies, insectes...);

– Les structures provenant d'êtres doués de raison, que nous qualifierons d'« intelligentes » (livres, ordinateurs, réseaux routiers, sonates de piano, démonstrations de théorèmes, avions, firmes industrielles, molécules de plastique, programmes de jeu d'échecs, gravures anciennes...).

Ces trois catégories peuvent être insuffisantes, notamment s'il existe des formes de vie inconnues différentes de la nôtre, ou des êtres superintelligents qui produisent des objets dont nous ignorons la nature, voire dont nous ne percevons pas qu'ils sont structurés. Il se peut aussi qu'il y ait continuité entre les trois types de structures envisagées – physiques, vivantes et intelligentes – et que notre distinction soit chimérique.

La musique des baleines nous incite à la prudence : qui, en entendant ces sons sans savoir comment ils ont été enregistrés, aurait compris qu'ils venaient d'animaux intelligents en train de communiquer et non d'un

phénomène physique ? Nous supposons dans la suite que les trois niveaux sont distincts, non ambigus et que tout s'y range bien. Vous pouvez tester cette hypothèse en vous demandant si vous changeriez de catégorie certains exemples donnés entre parenthèses où si vous en connaissez qui n'appartiennent à aucune des trois catégories.

Se pose alors une question : comment identifier le type d'une structure vue sur Terre ou ailleurs, et est-ce toujours possible ?

Le problème est important dans plusieurs domaines et pourtant cette identification des origines n'est l'objet d'aucune discipline cataloguée. Il est intéressant et amusant de voir comment, lorsqu'elle se pose, on la résout (pas toujours, toutefois !) dans les disciplines qui y sont confrontées.

Les hypothèses de SETI

Le projet SETI (*Search for Extra-Terrestrial Intelligence*) recherche des signaux incontestablement d'origine intelligente.

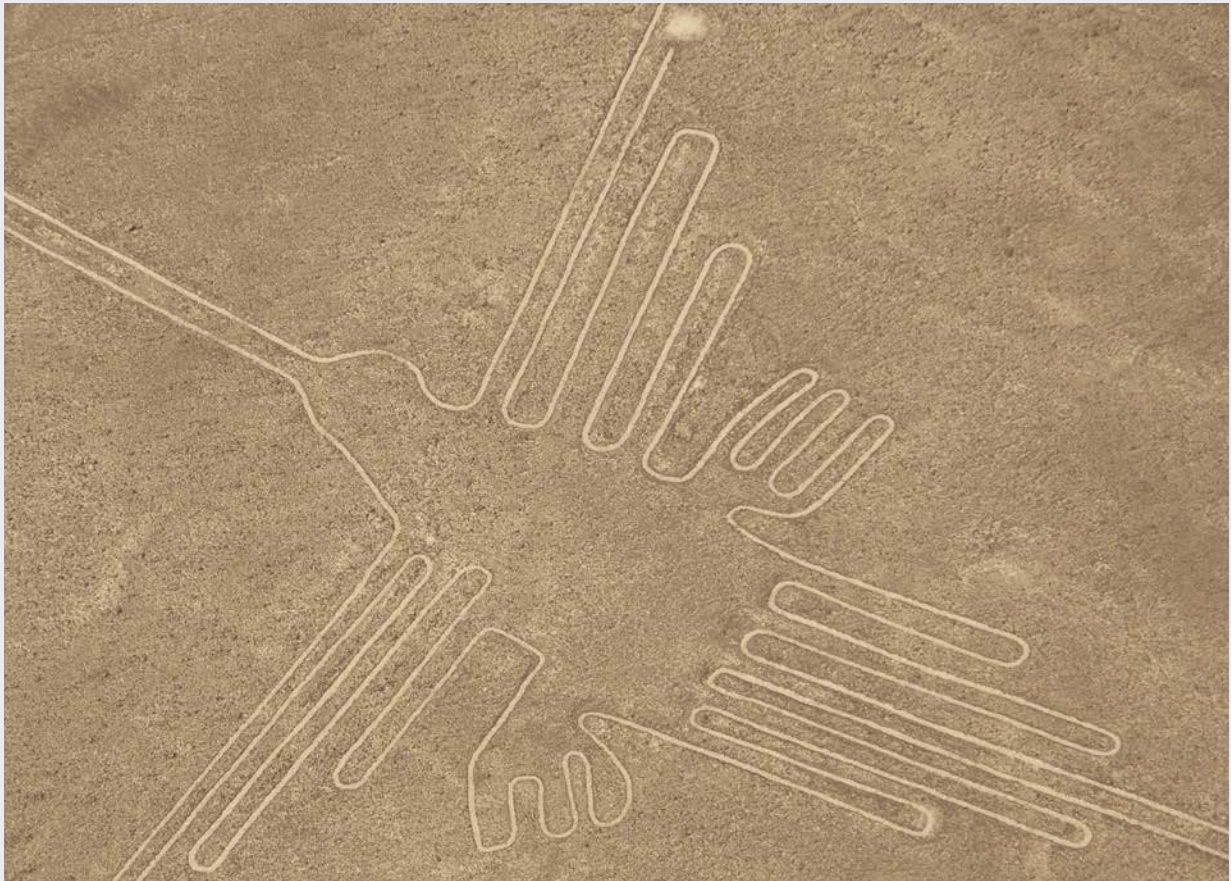
Les travaux de SETI consistent principalement à examiner des ondes enregistrées par des radiotélescopes et à y rechercher des signaux à faible largeur de bande (c'est-à-dire dont la gamme de fréquences est étroite), éventuellement pulsés (c'est-à-dire périodiques). L'idée est que les signaux à faible largeur de bande ne se trouvent habituellement pas dans la nature et donc que si l'on en reçoit, ils proviendront d'une émission produite par une intelligence

extraterrestre. Celle-ci, pour émettre loin, aura choisi d'émettre sur une faible largeur de bande, moins gourmande en puissance, et qu'elle jugera identifiable par les radiotélescopes d'autres civilisations avancées pour qui les signaux à faible largeur de bande seront les mieux identifiables ! Le raisonnement est fondé sur l'hypothèse que si l'on détecte un signal à bande étroite et, mieux encore, s'il est pulsé, il provient d'une source intelligente, car la nature (le monde physique où aucun être intelligent n'intervient) ne produit aucun signal de ce type.

Cette hypothèse est discutable. On peut contester qu'un signal à bande étroite, ou périodique, soit nécessairement le résultat d'une activité intelligente. Lors de la découverte des pulsars, en 1967, on a cru, à cause de la période très stable d'émission, avoir capté un signal extraterrestre. Aussi les découvreurs Jocelyn Bell et Antony Hewish baptisèrent LGM1 le signal, pour *Little Green Man 1*. Après discussions et spéculations, les spécialistes conclurent que l'émission provenait d'une étoile à neutrons en rotation rapide sur elle-même. Il y avait bien un signal périodique rapide... mais pas de petits hommes verts.

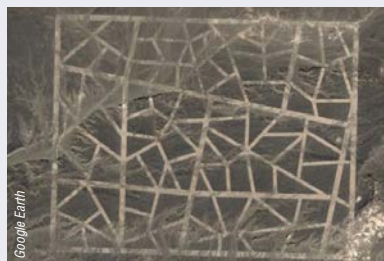
Une autre hypothèse est implicite : une structure vivante, mais non intelligente (n'ayant pas évolué jusqu'à une civilisation technologique), ne peut pas émettre un signal (pulsé ou non) à faible largeur de bande. Or il pourrait exister des formes de vie dont les organismes auraient des modes de fonctionnement très différents et soient capables,

Des images énigmatiques, mais d'origine humaine



© John Kershner/shutterstock.com

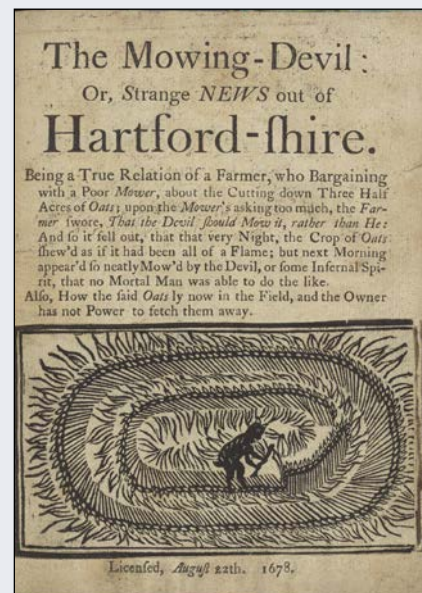
A la surface de la Terre, des formes étranges sont vues de satellites. Dans le désert du sud du Pérou réside l'une des grandes énigmes de l'humanité : les dessins ou géoglyphes de Nazca (*ci-dessus*), longs de plusieurs kilomètres, dont on ne connaît ni les auteurs, ni la signification en dépit de nombreuses études depuis leur découverte en 1927. D'étonnantes structures en Chine (*ci-contre, en haut*) ont été photographiées en 2011 par Google Earth. Personne ne doute qu'elles résultent de constructions intentionnelles humaines. Mais à quoi servent-elles ? Les cercles de culture comme ceux du Wiltshire en Angleterre (*ci-contre, en bas*) ont longtemps été mystérieux et les hypothèses les plus folles ont circulé, notamment une origine satanique qui était déjà évoquée dans une gravure sur bois de 1678 (*à droite*).



Google Earth



Lucy Pingle doc Crochamps



Folger Shakespeare Library

même s'ils n'ont pas atteint un niveau d'intelligence élevé, d'émettre les signaux que nous recherchons. Il s'agit là de spéculations difficiles à préciser, mais n'oublions pas que l'Univers n'est pas aussi simple que ce nous croyons en savoir. Souvenons-nous par exemple du temps où les savants refusaient l'idée qu'il puisse tomber des pierres du ciel. C'est seulement au début du XIX^e siècle que les physiciens Ernst Chladni et Jean-Baptiste Biot ont montré que les météorites provenaient vraiment de l'espace.

Il est donc sage de formuler le projet SETI et ses analogues de manière prudente : on recherche un signal à bande étroite et si possible pulsé, et si nous en trouvons un, il faudra l'analyser attentivement avant de le rattacher à une source intelligente.

Henry Lin, du Harvard College aux États-Unis, Gonzalo Abad et Abraham Loeb, du centre d'astrophysique Harvard-Smithsonian, ont proposé récemment une méthode de détection de la vie extraterrestre fondée sur l'analyse spectrale de l'atmosphère des

planètes de type terrestre. Des traces de photosynthèse dans l'analyse spectrale de la lumière provenant de ces planètes seraient un indice suggérant une forme de vie.

Détecter de la pollution sur une exoplanète

Pour aller plus loin, il faudrait repérer des indices en faveur de la présence d'une société industrielle, et donc d'une forme d'intelligence. Ces auteurs suggèrent de s'intéresser aux CFC (chlorofluorocarbures) qui trahiraient la présence d'une civilisation avancée polluante. Si ce sont des CFC à courte durée de vie, nous aurons affaire à une civilisation active (au moment où la lumière a été émise). Si ce sont des CFC à longue durée de vie, cela signifiera qu'une telle civilisation polluante a existé dans les 100 000 ans qui précèdent l'émission de cette lumière (100 000 ans est la durée de vie estimée des CFC les plus persistants). Les auteurs pensent que les télescopes de la prochaine

génération seront capables d'effectuer ces analyses spectrales.

Les signaux extraterrestres ne sont pas nécessairement dans le ciel, ils pourraient être dans le génome des êtres vivants. Dans un article de la revue d'astronomie *Icarus* paru en 2013, le mathématicien Vladimir Shcherbak et l'astrophysicien Maxim Makukov, d'Almaty au Kazakhstan, affirment que les caractéristiques du code génétique en démontrent l'origine intentionnelle et intelligente : pour eux, le code génétique serait trop parfait pour être apparu spontanément et aurait été introduit sur Terre par des êtres intelligents.

Malgré l'arsenal statistique déployé dans leur article, l'argumentation est faible : les défenseurs de ce « SETI génomique » s'émerveillent de la simplicité du code et non de sa complexité. Or l'apparition spontanée de structures simples et performantes par le jeu des contraintes du monde physique, ici de la sélection naturelle au cours de plus de trois milliards d'années, ne doit pas nous étonner, car la simplicité et certaines formes de perfection ne sont pas rares chez les organismes vivants (pensons aux perles dans les huîtres). Par ailleurs, les régularités arithmétiques que les auteurs présentent comme extraordinaires ressemblent aux coïncidences que les numéologues voient dans la Bible ou dans les décimales de π , et ne pourraient résulter, selon ces crédules, que d'une inscription délibérée par un être intelligent !

L'argument de ces chercheurs est proche de celui des créationnistes et des tenants de l'*Intelligent Design* : les êtres vivants sont trop bien organisés pour émerger des dynamiques physico-chimiques et des processus darwiniens de type variation-sélection. La réponse à ces élucubrations est simple : si les processus de la sélection naturelle engendrent des êtres aussi parfaits et délicats que les chats, les moustiques ou les orchidées, alors pourquoi la sélection naturelle ne pourrait-elle pas aussi aboutir au code génétique, quelle que soit la perfection qu'on croit y déceler ?

La recherche de vie extraterrestre primitive, et non plus d'intelligence extraterrestre, est aussi soumise au problème de l'identification du type de structures (physiques, biologiques ou intelligentes). De vives controverses portent sur la météorite

Des fossiles provenant de Mars ?

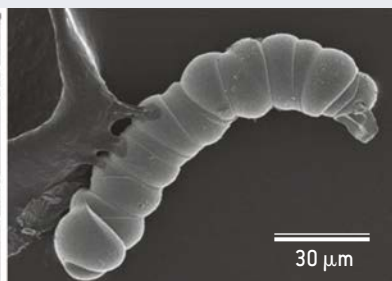
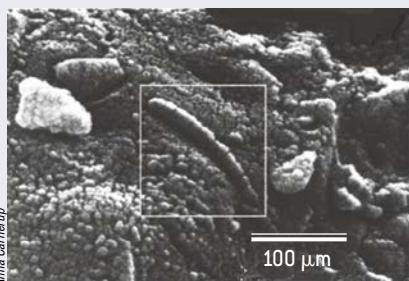
D'après sa composition, la météorite ALH84001 trouvée en Antarctique proviendrait de Mars, où elle aurait été arrachée par un choc de la planète avec une autre météorite et projetée dans l'espace avant d'arriver sur Terre. Des formes tubulaires (photographie de gauche) à sa surface ressemblent à des bacilles.

David McKay de la Nasa et plusieurs de ses collègues conclurent de l'analyse de ces formations qu'il s'agissait de fossiles d'une forme primitive de vie martienne. Depuis, cette

thèse a été contestée.

Outre de savantes considérations géochimiques et cristallographiques, l'incertitude provient de ce que les formes martiennes étranges ressemblant à ce

qui pourrait être des bacilles ne sont pas structuellement assez complexes pour que l'origine biologique s'impose de toute évidence, cela d'autant plus qu'on a appris à créer en laboratoire des formes (photographie de droite) assez proches de celles trouvées sur ALH84001 sans avoir à faire intervenir aucune action biologique directe ou indirecte.



ALH84001, découverte en 1984 dans l'Antarctique. D'après leurs analyses chimiques, les spécialistes affirment depuis 1993 qu'elle provient de Mars où elle se serait formée, il y a 4 milliards d'années, puis une collision avec une météorite l'aurait éjectée il y a 15 millions d'années, avant qu'elle n'arrive sur Terre il y a 13 000 ans. L'examen au microscope électronique montre sur la météorite des structures tubulaires qui seraient, selon certains, des fossiles de formes bactériennes. Ces structures sont plus petites que les formes terrestres analogues, ce qui éliminerait l'idée d'une contamination.

Des traces contestées

L'événement fut jugé si important que le président américain Bill Clinton en fit l'annonce à la télévision. En août 1996, un article de la revue *Science* signé par David McKay, de la Nasa, fournit des photos et l'analyse de la découverte. Aujourd'hui, il semble que ce sont les doutes qui l'emportent quant à la nature biologique des structures trouvées sur ALH84001. Des structures assez proches ont été obtenues en laboratoire par des processus physiques, sans impliquer une forme de vie. Par ailleurs, les critères qui démontreraient une origine biologique ne sont pas tous satisfaits. Les opposants argumentent que la nature chimique des parties structurées et les processus de fossilisation laisseraient des traces qui sont absentes.

La ressemblance morphologique est un argument délicat : si l'on exige que les traces trouvées et tout ce qui les entoure ressemblent à ce qu'on a déjà trouvé pour certains fossiles terrestres, ne risque-t-on pas de passer à côté d'une forme de vie différente de celle qu'on connaît ? Le paléobiologiste anglais Martin Brazier, qui ne croyait pas à la nature biologique des tubules de la météorite martienne, a exprimé une réserve sous une forme plus générale : « La complexité seule n'est pas un signal fiable de l'origine biologique. »

Pourtant, le seul moyen de ne pas passer à côté des formes de vie éloignées de la nôtre n'est-il pas au contraire de se fixer un critère

Première trace de vie sur Terre ?

Découverts par William Schopf en Australie en 1987 dans une roche dénommée Apex Chert, ces filaments de carbone sont datés d'il y a 3,5 milliards d'années. Pendant un moment, ils furent considérés comme les plus anciennes traces de vie sur Terre. Leur nature biologique est aujourd'hui contestée.



lié à la complexité ? Seule la vie et ses longs processus d'élaboration progressive produisent des structures finement organisées. La physique peut certes conduire à certaines formes ressemblant à des bacilles (cela a été réalisé en laboratoire), mais jamais elle n'est en mesure de donner rapidement des structures hiérarchisées comme celles d'un tissu vivant organisé en couches, chacune constituée de formes cellulaires elles-mêmes composées de sous-structures.

Les formes identifiées sur la météorite ALH84001 ne sont pas très complexes et un pur critère de complexité ne permet pas de conclure à une forme de vie. Même si, ici, les critères formulés par Brazier aboutissent à la même conclusion négative, il faut rester prudent et ne pas fixer des exigences que seules les formes de vie identiques à la nôtre pourraient satisfaire : la complexité reste le meilleur critère absolu qui ne nous ferme pas les yeux.

Est-il plus simple de repérer les premières formes de vie terrestres ? Ce n'est pas certain, comme en atteste une autre controverse sur des filaments de carbone découverts dans

une roche dénommée *Apex Chert*, en Australie. Ces structures repérées en 1987 par William Schopf, de l'université de Californie à Los Angeles, sont vieilles de 3,5 milliards d'années. Elles ont été un temps considérées comme les plus anciens fossiles terrestres.

Les cyanobactéries fixent le carbone en utilisant l'énergie de la photosynthèse. La preuve que les filaments retrouvés sont des fossiles de tels organismes – hypothèse proposée par William Schopf – aurait constitué une avancée déterminante dans notre compréhension de l'apparition de la vie sur Terre. Or les partisans d'une origine biologique de ces filaments semblent en mauvaise posture. Bien qu'un article de 2012 signé par William Schopf et Anatoliy Kudryavtsev proclame la résolution définitive de la controverse en faveur de l'hypothèse biologique, plusieurs articles publiés depuis défendent la thèse inverse ! En particulier, en 2015, David Wacey, de l'université de Bristol, et ses collègues se fondent sur l'examen à l'échelle nanométrique des roches concernées et concluent que les filaments ne présentent pas une « morphologie

Premières œuvres d'art ?

Dans des endroits où l'étude des couches géologiques et les méthodes de datation ne laissent aucun doute, les paléontologues sont amenés à découvrir des objets ayant été entre les mains d'hominidés (ici des Néandertaliens) bien identifiés ou résultant de leurs activités.

C'est le cas de cette pierre trouvée dans une grotte à Gibraltar. Joaquín Rodríguez-

Vidal et ses collègues interprètent les traces qu'elle porte comme les premières

marques de dessins symboliques et artistiques. Même si l'étude microscopique révèle que les traces résultent de l'action répétée d'un objet pointu, doit-on vraiment considérer comme établi que ces croix très approximatives résultent d'une action intelligente intentionnelle ?



Stewart Finlayson, Gibraltar Museum

biologique ». Leur article propose aussi l'hypothèse que les filaments se sont formés dans les écoulements d'une source hydrothermale, et qu'il s'agit d'artefacts minéraux.

Là encore, les arguments échangés dans le débat sont délicats et oscillent entre des remarques liées à la complexité des structures en jeu, dont on prétend qu'elle est trop grande pour provenir d'un simple processus chimique ou minéral (affirmations des défenseurs d'une origine vivante), et des assertions que rien de ressemblant n'existe vraiment dans le monde vivant connu ou que la relativement faible complexité morphologique des structures ne permet pas d'exclure une origine abiotique, qu'on réussit d'ailleurs plus ou moins à reconstituer

en laboratoire (arguments des opposants à l'origine biologique).

Les raisonnements sont incertains, presque subjectifs. En se fondant sur ce qu'on sait de la vie terrestre, on peut certes fixer des critères drastiques qui rejettent l'hypothèse d'une origine biologique des formes étranges rencontrées, mais ce sera en prenant le risque d'éliminer des formes de vie que l'on n'imagine pas. Avant qu'on découvre de la vie autour des sources hydrothermales profondes en 1977, on jugeait impossible qu'une vie ne repose pas sur l'énergie solaire, et que des bactéries utilisent à la place le sulfure d'hydrogène.

On rencontre des affirmations controversées dans un autre domaine encore : la

paléontologie. Le problème est de reconnaître sur un caillou ou un coquillage qu'une trace a été faite par un humain avec l'intention d'y graver un signe ou un dessin.

Donnons un seul exemple. En juin 2014, PNAS, la revue de l'Académie des sciences des États-Unis, a publié un article de Joaquín Rodríguez-Vidal et d'autres préhistoriens, qui analysent des marques découvertes dans une grotte et affirment qu'il s'agit de la première trace d'une « pensée abstraite s'exprimant par l'usage de formes géométriques ».

La gravure, d'une vingtaine de centimètres, sur laquelle se fonde cette affirmation comporte plusieurs entailles. Elle a été trouvée dans la grotte de Gorham, à Gibraltar, qui a abrité des Néandertaliens. Sous une couche de sédiments permettant d'affirmer que les traces datent d'au moins 39 000 ans est apparue une sorte de croix en creux dans la roche (voir l'encadré ci-contre). L'analyse microscopique montre que ces tracés résultent d'un mouvement répété plusieurs dizaines de fois, vraisemblablement à l'aide d'une pierre.

De l'art néandertalien ?

L'origine humaine n'est pas douteuse, mais l'affirmation qu'il s'agit d'un dessin délibéré de nature symbolique ou artistique est difficile à admettre. Est-ce qu'un instrument utilisé pour travailler du bois, de la peau ou une pierre ne pourrait pas avoir laissé, sur une sorte de plan de travail, des traces de ce type qui ne seraient donc ni intentionnelles ni symboliques ? D'autres causes ne pourraient-elles pas produire de telles marques en creux ?

À nouveau, il semble que ce soit la simplicité des motifs gravés qui pose problème. Quand on découvre la pierre de Rosette en Égypte, ou le disque de Phaistos en Crète, même si l'on n'arrive pas à en comprendre le sens (c'est toujours le cas pour le disque), la complexité et la richesse des structures qu'on y observe conduisent à la conclusion incontestable qu'il s'agit d'un objet ayant une origine intelligente et intentionnelle. Ici, on en est loin et y voir la naissance de l'art ou de la pensée symbolique apparaît précipité. L'analyse en

termes de simplicité et de complexité est importante et parfois décisive. Mais dans les cas incertains, les conclusions ne peuvent provenir que d'observations et de raisonnements complémentaires : datations, objets environnants, connaissances chimiques ou autres... La simple prise en compte de la taille des structures analysées est parfois un élément capital pour formuler une conclusion.

Considérons par exemple la forme cubique. Il ne fait aucun doute que si l'on découvre un objet parfaitement cubique de 10 mètres ou de 1 000 kilomètres de côté, on considérera comme presque certain qu'elle est due à l'action d'une forme d'intelligence (c'est l'idée du monolithe $1 \times 4 \times 9$ du film *2001, l'Odyssée de l'espace*), alors que le même cube parfait de moins d'un centimètre de côté existe dans la nature sous forme naturelle cristalline. Découvrir un cube parfait ne doit donc pas être interprété de la même façon selon sa taille. La raison de nos interprétations différentes provient de ce que la simplicité n'est jamais un critère concluant (un cube est simple).

La forme sphérique parfaite aussi conduirait à des conclusions différentes selon la taille. Il est cependant assez amusant de remarquer que les conclusions obtenues ne sont pas les mêmes que pour le cube : une forme naturelle sphérique parfaite très petite est possible (goutte d'eau, perle d'huître), très grande aussi (planète, étoile), alors qu'en revanche une taille moyenne – un mètre de rayon par exemple – signifierait presque certainement une action intelligente.

La complexité, critère primordial

Les erreurs les plus ennuyeuses commises dans l'identification d'une structure se sont toujours produites en considérant que la structure appartenait à une catégorie dont elle n'avait pas la complexité de ses représentants typiques. Les signaux LGM1 étaient simplement périodiques, ce qui n'est pas caractéristique des signaux intelligents (les cristaux sont périodiques, la trajectoire des planètes est périodique, etc.). Les structures sur la météorite martienne étaient arrondies, certes, et semblables superficiellement à

des bacilles, mais les formes arrondies existent aussi dans le monde minéral. La complexité des pseudobacilles n'était pas bien grande et certainement pas autant que peut l'être une cellule ou un organe ; ils ne pouvaient donc pas sans risque être rattachés à une forme de vie.

Mesurer la complexité : des outils insuffisants

Les trois catégories envisagées sont liées à trois niveaux différents de complexité structurelle, dont la théorie du calcul nous suggère qu'elle doit être conçue comme un contenu en calcul (voir dans cette rubrique « Qu'est-ce qu'un objet complexe ? », Pour la Science, mai 2013). Les structures les plus complexes sont liées à l'intelligence, au niveau intermédiaire on a affaire à des structures vivantes ou intelligentes (les structures produites par l'intelligence sont parfois simples), et à un niveau inférieur on a affaire à des structures physiques, biologiques ou intelligentes.

Face à une structure simple, l'identification du bon niveau ne peut se faire qu'en prenant en compte d'autres informations telles que les couches géologiques où l'objet a été trouvé, l'échelle de la structure, ce qu'on sait de la physique, de la chimie, etc.

Malheureusement, les outils pour mesurer la complexité structurelle sont aujourd'hui insatisfaisants. Cette évaluation de complexité se fait directement et s'appuie sur notre jugement – nous savons par exemple qu'un dessin est complexe en y reconnaissant un arbre ou un animal –, mais c'est là une méthode subjective et difficile à quantifier.

Les autres méthodes d'évaluation de complexité structurelle sont soit trop particulières et *ad hoc*, par exemple quand on compte le nombre de symboles différents sur ce qui ressemble à un texte, soit générales mais peu fiables, comme celles utilisant les algorithmes de compression. Même si aucune solution générale automatique et sûre n'est disponible aujourd'hui, on doit adopter des points de vue clairs et raisonnables qui évitent des conclusions précipitées : il nous faut raisonner prudemment en oubliant nos rêves.

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

S. T. Hyde, *Crystals : animal, vegetable or mineral ?*, *Interface Focus*, vol. 5, 20150027, 2015.

J. Rodríguez-Vidal *et al.*, *A rock engraving made by Neanderthals in Gibraltar*, *PNAS*, vol. 111, pp. 13301-13306, 2014.

H. W. Lin *et al.*, *Detecting industrial pollution in the atmospheres of Earth-like exoplanets*, *The Astrophysical Journal Letters*, vol. 792(1), L7, 2014.

J.-P. Delahaye, *Mesurer la complexité des objets numériques*, *Bull. de la Société Informatique de France*, vol. 1024, pp. 35-53, 2013 (<http://1024.labri.fr/1024-numero-1-delahaye.pdf>).

Références supplémentaires sur www.pourlascience.fr



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

SCIENCE & FICTION

De l'origine des espèces... extraterrestres

D'où vient la vie ? Les hypothèses scientifiques et les spéculations romantiques foisonnent, mais elles s'accordent sur un point : tout pourrait s'être joué dans l'espace.

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

Si les œuvres de science-fiction dépeignent souvent des extraterrestres complexes et des civilisations avancées, certains auteurs n'oublient pas de revenir aux origines pour évoquer l'émergence de la vie. Mais faute de modèles scientifiques consensuels, ils prennent alors quelques libertés pour imaginer comment la vie est apparue. Partons à la recherche de ces premières formes de vie extraterrestre !

Les fossiles les plus anciens découverts sur Terre sont âgés d'environ 3,5 milliards d'années : ils suggèrent qu'à cette époque, des bactéries et autres microbes (notamment les archées, cousines des bactéries) pullulaient déjà dans les océans du globe et formaient des concrétions biominérales, les stromatolithes, que l'on trouve encore le long des côtes en Australie. Notons que du carbone d'origine probablement biologique, datant de 4,1 milliards d'années, a aussi été découvert en Australie, ce qui repousserait l'apparition de cette vie de quelques centaines de millions d'années. Ces tout premiers restes témoignent d'une vie très ancienne et apparue assez rapidement – géologiquement parlant – après la formation de la planète (il y a environ 4,56 milliards d'années).

Si les spécialistes de cette vie ancienne se réjouissent de découvrir des fossiles de plus en plus âgés, ceux qui travaillent sur les modalités même de leur apparition sont plus perplexes, car aucun consensus n'est encore atteint. En effet, plusieurs modèles sur l'origine

de la vie s'opposent, en fonction des disciplines et de leurs propres définitions de la vie. Selon les généticiens, la vie est avant tout un système de reproduction d'information dont les erreurs de copie sont retenues, ou non, par la sélection naturelle. Dans ce cadre, le support d'information génétique tel que l'ARN serait apparu avant la membrane cellulaire.

Or, d'après les biochimistes, c'est justement l'inverse qui se serait produit : pour eux, la vie se définit comme un système contenu dans une membrane semi-perméable de sa propre fabrication, permettant un transfert de matière et d'énergie, notamment pour sa reproduction. Selon cette définition, le métabolisme joue donc un rôle primordial.

La question de l'origine de la vie a de tout temps titillé l'imagination. Ainsi, des écrits tirés du folklore hébreu du XVI^e siècle relatent l'histoire d'un certain Juda Loew ben Bezalel, rabbin de Prague, qui, pour défendre les juifs des persécutions, transformait par magie de la boue en une créature anthropoïde connue sous le nom de Golem. Ce grand humanoïde fictif, lorsqu'il est représenté, n'est pas sans rappeler La Chose, superhéros plus récent de l'univers Marvel et un des Quatre Fantastiques. À la différence près que La Chose n'est pas une montagne de boue humaine mais un astronome d'origine juive, Benjamin Jacob Grimm, qui a muté à la suite d'une forte exposition à des rayons cosmiques.

L'histoire du Golem, comme celle de la création d'Adam à partir d'argile, évoque une transformation spontanée et directe



LE PERSONNAGE DE « LA CHOSE », membre des Quatre Fantastiques, rappelle, par son aspect rocheux, le Golem, constitué d'argile et auquel la vie a été insufflée par magie.



LA VIE SERAIT ARRIVÉE SUR TERRE sous la forme de molécules complexes – tels des acides aminés – grâce aux comètes riches en glace. C'est une hypothèse envisagée par les chercheurs. Ces corps pourraient-ils aussi transporter des organismes, à l'image des tardigrades ou des bactéries ?

de matière minérale en humanoïde. Ces métaphores religieuses de l'homme modelé à l'image de Dieu préfigurent la vision erronée que l'évolution aboutit à l'homme, vu comme la plus complexe de toutes les espèces.

En revanche, dans *Un amour de sable*, nouvelle de Sylvie Lainé (dans *L'Opéra de Shaya*, ActuSF, 2014), le sable d'une étrange planète est conscient, intelligent, mais loin de l'aspect humain. Cette forme de vie originale et siliceuse nous rappelle que l'intelligence n'est pas le propre de l'humanité (comme nous le montrent de nombreux animaux) et qu'une vie à base de silicium (autre que celle à base de carbone que nous connaissons) est peut-être envisageable.

Plus scientifique, le modèle de la panspermie a aussi beaucoup inspiré les auteurs de science-fiction. Cette hypothèse très en vogue suggère que la vie proviendrait d'un assemblage d'acides aminés, arrivés sur Terre lors d'impacts de comètes ou d'astéroïdes. Les matériaux cométaires notamment, avec leurs grains de poussière entourés de glace et à la chimie complexe, auraient fourni les précieux acides aminés qui joueraient le rôle de briques du vivant. Notons que sur Terre, seulement une vingtaine d'acides aminés environ se combinent et forment l'ensemble des eucaryotes – soit, selon les estimations, entre 5 et 30 millions d'espèces vivantes caractérisées par des cellules dotées d'un noyau et de mitochondries.

Dans sa nouvelle intitulée *L'Appel de la Nébuleuse* (Le Béliat, 2010), Claude Ecken

restitue d'une manière très poétique et précise les processus physicochimiques à l'œuvre dans un nuage moléculaire géant, de la formation d'un système planétaire à l'apparition de la vie. La panspermie est ici mise en avant pour imaginer l'apparition de formes de vie ailleurs dans l'Univers.

Le fantasme des Grands Anciens

Mais il est tentant de penser que, plutôt que des molécules, ce sont des espèces intelligentes qui auraient apporté la vie sur Terre. Cette idée, farfelue, est ancienne : dans son roman *Les Montagnes hallucinées* (1936), Howard Philips Lovecraft invente une mythologie complexe où notre planète aurait été, peu de temps après sa formation, visitée par des extraterrestres intelligents, les Anciens, pour y introduire la vie. L'histoire se complique lorsque ces Anciens, pour construire leurs cités enfouies, créent des êtres tentaculaires, les Shoggoths, qui échappent ensuite à tout contrôle.

Ce scénario a peut-être inspiré Ridley Scott pour le film *Prometheus* (2012) : celui-ci relate l'histoire d'extraterrestres humanoïdes, les « Grands Ingénieurs », qui ont créé la vie sur Terre, puis, plusieurs milliards d'années plus tard, le monstre Alien afin d'anéantir l'humanité devenue néfaste. Or l'expérience tourne mal, les terribles Aliens se retournant contre leurs créateurs.

Les histoires d'extraterrestres intelligents ayant créé la vie sur Terre ou ayant guidé l'évolution humaine sont nombreuses. Mais au-delà des œuvres de fiction, elles ont donné lieu à la théorie pseudoscientifique dite des anciens astronautes, qui interprète certains vestiges préhistoriques ou archéologiques comme étant dus à des extraterrestres.

Cette théorie est critiquée par la communauté scientifique tout entière, à commencer par le préhistorien Jean-Loïc Le Quellec : ce dernier a par exemple montré que les fameuses peintures rupestres sahariennes représentant des silhouettes longilignes ne sont pas des Martiens venus sur Terre il y a bien longtemps, mais des hommes et des femmes parés de costumes et de coiffes traditionnelles.

Cette réfutation sérieuse des dérives pseudoscientifiques n'empêche pas les scientifiques de conserver un certain humour : dans sa nouvelle *Genèses*, de 1958, le préhistorien et auteur de science-fiction François Bordes (sous le pseudonyme de Francis Carsac) mettait en scène un explorateur extraterrestre atterrissant sur notre proto-Terre : « Un monde sans vie, absolument stérile [...] Dans l'écume flottait seulement une glaire de composés organiques [...] Alors, la conscience tranquille et plein de mépris, il cracha dans la mer. » Une bien prosaïque origine de la vie sur Terre ! ■

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

ART & SCIENCE

L'Univers dans une assiette

Un artiste a réussi à faire entrer tout l'Univers observable dans une unique œuvre circulaire. Il a été aidé par les logarithmes et les travaux d'une équipe d'astronomes.

Loïc MANGIN

Encore ! Votre grand-tante a de nouveau craqué pour un bibelot... En l'occurrence, il s'agit d'une grande assiette décorative qui, trônant sur un napperon au-dessus de la télévision, s'offre au regard de tous les visiteurs. Mais, cette fois, vous êtes intrigué. À quoi correspond l'illustration (voir la figure ci-contre) ? Sur un fond essentiellement noir se détachent de nombreux éléments, notamment des petits cercles colorés, un halo blanchâtre, des taches diffuses, une sorte de toile d'araignée... Face à votre perplexité, votre aïeule vous éclaire : c'est l'Univers tout entier qui est figuré !

On doit cette représentation à l'artiste et musicien sud-américain Pablo Carlos Budassi. Avant de détailler comment il s'y est pris, vérifions que tout l'Univers observable est bel et bien contenu dans l'assiette de Tatïe.

Le Système solaire est au milieu, avec le Soleil au centre du disque. Puis viennent les planètes rocheuses (Mercure, Vénus, Mars, la Terre – orientée avec l'Afrique du Sud pointant vers le haut !). On distingue même la Lune. On a ensuite la ceinture principale d'astéroïdes (elle contient ici une comète), les planètes gazeuses (Jupiter, Saturne, Uranus et Neptune), la ceinture de Kuiper et le nuage d'Oort marquant la fin du Système solaire.

Autour de ce dernier, le halo blanchâtre circulaire correspond au bras de la Voie lactée qui contient le Système solaire. En s'éloignant encore du centre, on trouve

d'autres galaxies, puis le réseau de structures à grande échelle (les filaments de la « toile d'araignée ») où se regroupent préférentiellement toutes les galaxies.

Au-delà, le cercle rouge à la périphérie marque le fond diffus cosmologique (le rayonnement électromagnétique émis quand l'Univers, suffisamment refroidi, ne pouvait plus empêcher la propagation des photons sur de longues distances). Enfin, le bord noir et gris correspond aux quelque 380 000 ans durant lesquels, après le Big Bang, l'Univers est resté un plasma. Ainsi, près de 14 milliards d'années sont résumées !

Pablo Carlos Budassi a inscrit une sphère de 93 milliards d'années-lumière de diamètre dans un simple disque

La clé qui explique cette prouesse est l'idée de logarithme. Pablo Carlos Budassi s'est fondé sur les travaux de l'équipe de J. Richard Gott III et Mario Juric, à l'université de Princeton, aux États-Unis. En 2005, ces astronomes ont proposé une carte de l'Univers pour rendre compte des observations du *Sloan digital sky survey*. Depuis 2000, ce programme de relevé des objets célestes exploite un télescope optique dédié de 2,5 mètres de diamètre situé à l'observatoire d'Apache Point, au Nouveau-Mexique.

La carte, qui recensait 3 millions d'objets célestes, était une projection conforme

selon une échelle logarithmique. Expliquons. Une projection conforme conserve localement les angles. C'est le cas de la projection Mercator de la surface terrestre sur un planisphère : la forme d'une région, pour peu qu'elle ne soit pas trop grande par rapport à l'ensemble, est alors correctement rendue sur la carte.

Quant à l'échelle logarithmique, elle consiste en une progression exponentielle des valeurs le long d'un axe. J. Richard Gott III et Mario Juric l'illustrent en évoquant ces livres qui permettent d'appréhender les ordres de grandeur. D'une page à une autre, l'échelle est augmentée ou diminuée d'un facteur 10. C'est un moyen de comprimer l'espace.

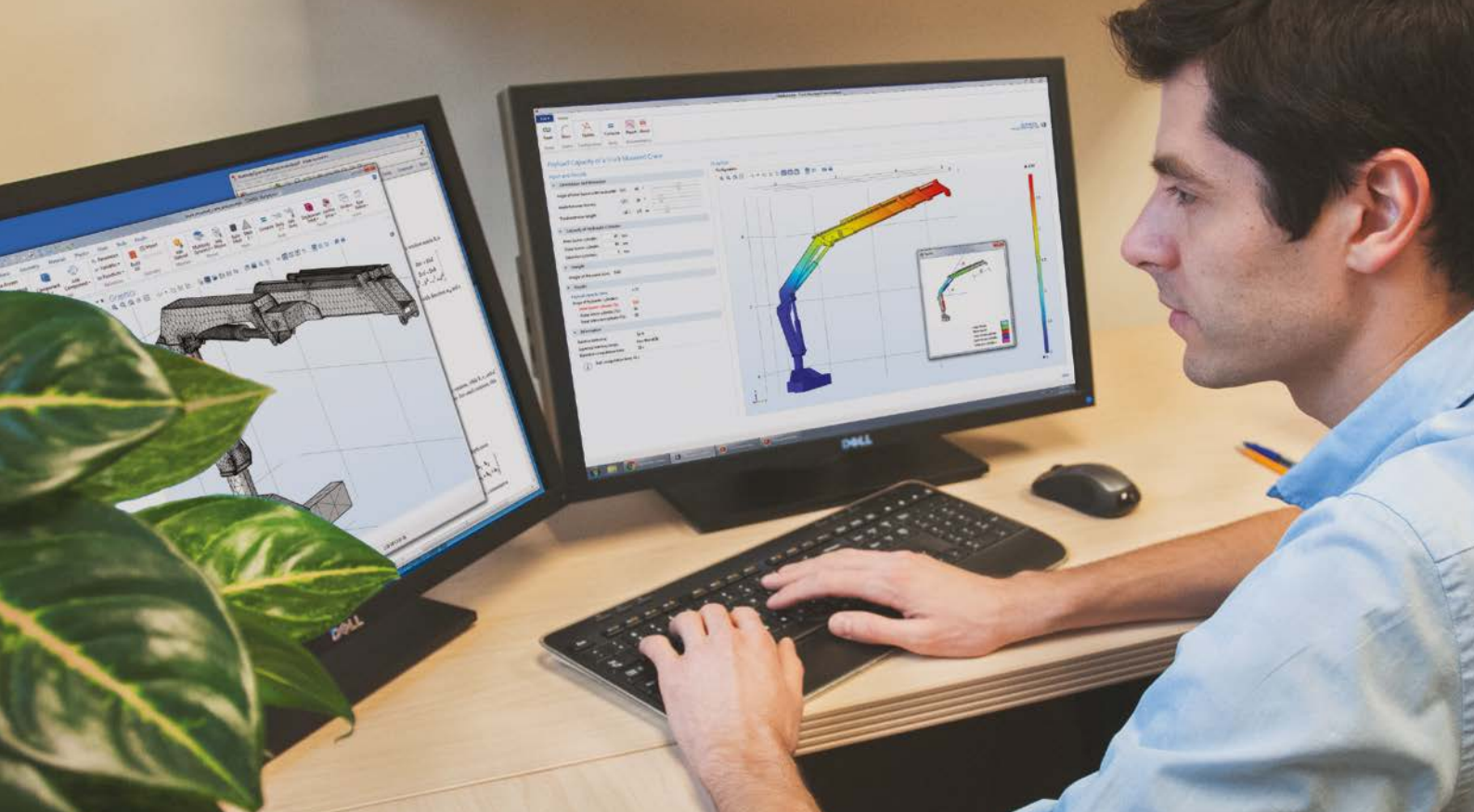
La carte des astronomes a été pour Pablo Carlos Budassi une sorte de toile sur laquelle, grâce au logiciel Photoshop, il a compilé des images de la Nasa collectées par des télescopes et les sondes. Il a ensuite comblé les trous. En fin de compte, il a réussi à inscrire une sphère de 93 milliards d'années-lumière de diamètre dans un simple disque.

Idée cadeau : l'œuvre de Pablo Carlos Budassi n'est que numérique. Faites-la imprimer sur un objet quelconque, une assiette par exemple, et offrez-le... à qui vous voulez ! ■

J. R. Gott III et al.,
A map of the universe,
The Astrophysical Journal,
vol. 624, pp. 463-484, 2005.



© Pablo Carlos Budassi / Ummismoojetivo



LA MULTIPHYSIQUE POUR TOUS

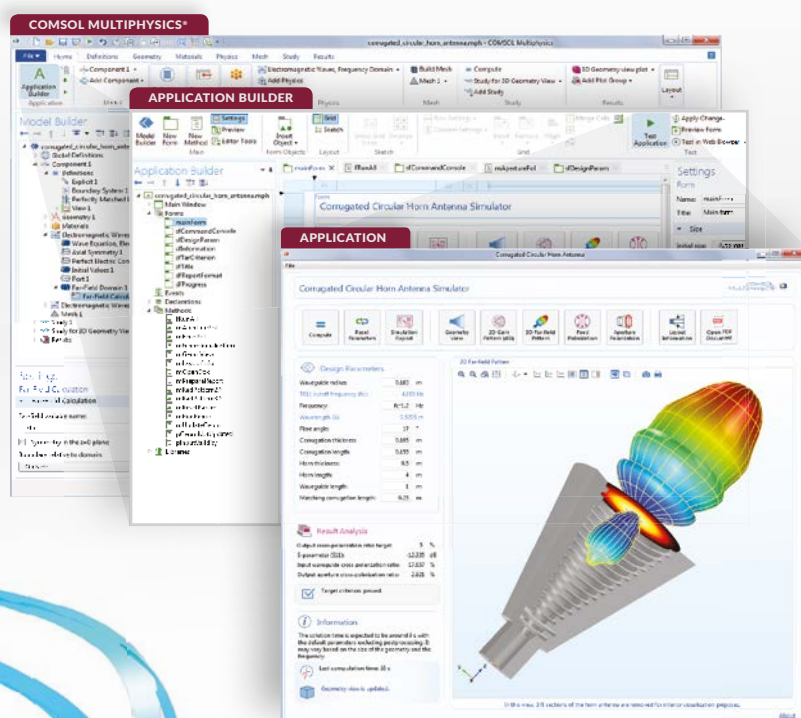
L'évolution des outils de simulation numérique vient de franchir un cap majeur.

Des applis spécialisées sont désormais développées par les spécialistes en simulation avec l'application Builder de COMSOL Multiphysics®.

Une installation locale de COMSOL Server™, permet de diffuser les applis dans votre organisme et dans le monde entier.

Faites bénéficier à plein votre organisme de la puissance de l'outil numérique.

comsol.fr/application-builder



IDÉES DE PHYSIQUE

Des valves à lumière dans les écrans

Comment fonctionnent les écrans à cristaux liquides, ou LCD ?

Le principe consiste à contrôler la polarisation de la lumière, au moyen d'un champ électrique appliqué aux cristaux.

Jean-Michel COURTY et Édouard KIERLIK

Chaussez des lunettes polarisantes et regardez votre écran de télévision, de tablette ou de téléphone mobile : l'écran s'assombrit. Pourquoi ? Parce que, comme nous allons le voir, la lumière qui émerge des pixels actifs de l'écran est elle-même polarisée, mais dans une direction différente de celle des lunettes.

En fait, les pixels des écrans actuels constituent des « valves » qui bloquent ou laissent passer de la lumière émise en permanence à l'arrière de l'écran. Ces valves fonctionnent grâce à un champ électrique qui établit un lien entre deux propriétés *a priori* bien éloignées : la polarisation de la lumière et l'orientation des molécules organiques dont sont constitués les « cristaux liquides ». Quel est ce lien ?

Des molécules orientables à volonté

Commençons par les cristaux liquides, plus précisément ceux qualifiés de nématiques. Ces liquides sont composés de molécules organiques allongées, sans ordre dans leurs positions, mais avec la même orientation (comme des allumettes dans une boîte). Leurs propriétés physiques, et notamment électriques et optiques, dépendent donc de la direction considérée par rapport à cette orientation privilégiée, comme dans un solide cristallin.

Au début du XX^e siècle, le physicien français Charles-Victor Mauguin a découvert qu'il

était possible de contrôler mécaniquement cette orientation. En effet, quand les molécules du cristal liquide sont au contact d'une surface striée, elles s'alignent dans la direction des stries. Les forces intermoléculaires ont alors pour résultat d'orienter l'ensemble des molécules du liquide parallèlement aux molécules en contact avec la surface.

Plus subtilement, si l'on coince une couche de cristal nématique entre deux surfaces, l'une striée dans une direction, l'autre striée dans la direction perpendiculaire, on obtient un cristal nématique dit

torsadé : l'orientation des molécules varie continuellement le long de l'épaisseur de la couche, en adoptant la structure d'une hélice qui fait un quart de tour. Nous verrons que cette structure joue un rôle crucial dans les dispositifs d'affichage.

Intéressons-nous maintenant à la lumière, et plus précisément à sa polarisation. Comme toutes les ondes électromagnétiques, une onde lumineuse est formée d'un champ électrique et d'un champ magnétique qui oscillent de concert en se propageant. Les deux champs sont perpendiculaires entre eux et à l'axe de propagation. Par définition, la polarisation caractérise la direction du champ électrique.

Pour la plupart des lumières (naturelle ou d'une lampe à filament), cette direction est aléatoire et varie sans cesse au cours du temps. On parle de lumière non polarisée.

Dans certaines situations, en revanche, la direction de polarisation est fixe. On parle alors de polarisation rectiligne. Le moyen le plus simple d'obtenir une polarisation rectiligne est d'utiliser un filtre polarisant (à base de matériaux cristallins). Ce polariseur laisse intégralement passer la lumière lorsque le champ électrique de cette dernière est parallèle à une direction donnée (l'axe du polariseur) et l'absorbe totalement si le champ est porté par l'axe perpendiculaire. Ainsi, lorsque de la lumière non polarisée traverse un polariseur, elle se polarise selon l'axe de ce dernier.

Comment changer la direction de polarisation de cette lumière ? Si l'on place un



Dessins de Bruno Vazaro

LES ÉCRANS D'AFFICHAGE à cristaux liquides comportent deux films polarisants. La lumière qui en émerge est de polarisation rectiligne. Si l'on retire le film polarisant externe d'un écran allumé, la partie découverte apparaît uniformément éclairée.