

R

ENDEZ-VOUS

P. 82 Logique & calcul
P. 88 Art & science
P. 90 Idées de physique
P. 94 Chroniques de l'évolution
P. 97 Science & gastronomie
P. 98 À picorer

L'UNIVERS ET LA MORALE VUS PAR LA THÉORIE DU CALCUL

Si l'on considère toute interaction physique comme une sorte de calcul, on est amené à repenser l'évolution de l'Univers, voire à donner des fondements computationnels à l'éthique.

L'AUTEUR



JEAN-PAUL DELAHAYE
professeur émérite
à l'université de Lille
et chercheur au Centre
de recherche en
informatique, signal
et automatique de Lille
(Cristal).

L'Univers n'est pas stable; il s'organise progressivement, se «complexifie». La matière et l'énergie sont des éléments essentiels pour comprendre cette évolution du cosmos, mais leur accorder trop d'importance empêche peut-être de saisir vraiment ce qui se passe.

La théorie du calcul nous aide à évaluer les capacités des ordinateurs, notamment leur puissance, à mesurer et à comparer les algorithmes et à donner un sens au mot «complexité». Elle propose une vision de ce qu'est l'évolution de l'Univers en termes non matériels et non énergétiques.

Les scientifiques qui ont contribué à cette vision informationnelle et computationnelle de l'Univers sont nombreux: ils construisent petit à petit une interprétation nouvelle de l'évolution cosmique, vue comme un progrès du calcul, et certains en ont même déduit des considérations éthiques. Parmi les plus importants de ces chercheurs citons Andrei Kolmogorov, Leonid Levin, Gregory Chaitin, Charles Bennett, John Mayfield, Luciano Floridi, Seth Lloyd et plus récemment Hector Zenil, Cédric Gaucherel et Clément Vidal avec qui j'ai travaillé.

Les astrophysiciens décrivent l'histoire cosmique comme un refroidissement faisant apparaître des composants stables de plus en plus complexes, lesquels interagissent et se combinent selon des règles précises conduisant aux atomes, puis aux molécules organiques et à la vie.

Les théoriciens du calcul interprètent cela sous une forme abstraite: petit à petit, l'Univers

a donné naissance à des structures qui, en interagissant, effectuent des sortes de calculs, et la stabilité de ces structures fait que les résultats des calculs sont conservés et accumulés.

Ainsi, l'évolution biologique élabore des organismes vivants aux formes variées. Les calculs avec mémorisation de la génétique s'effectuent avec une efficacité croissante et donnent naissance à une «complexité organisée». En particulier, les vertébrés supérieurs disposent de cerveaux pour traiter les données fournies par les sens et en garder le souvenir et, chez les humains, le langage et l'écriture accroissent l'efficacité des traitements de l'information et le stockage des résultats. Les technologies de l'information conduisent à leur tour à de nouveaux progrès en efficacité de calcul et de mémorisation massive d'informations. Ces soixante dernières années, la vitesse de calcul informatique et la capacité de stockage de l'information ont été multipliées par plus de un million. Le calcul et le stockage cumulatif de l'information progressent dans l'Univers, en même temps qu'augmente la complexité organisée.

DEUX NOTIONS DE COMPLEXITÉ

Le mathématicien soviétique Andrei Kolmogorov, avec Leonid Levin, et, indépendamment, Gregory Chaitin ont proposé une mesure de la complexité des objets numériques (textes, images, sons, vidéos, etc.), qu'on peut appliquer à tous les objets (discrétisés) de l'Univers. La taille du plus court programme engendrant l'objet *Ob* est cette



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

LA VIE, LES ARTS ET LES SCIENCES VUS COMME UN CALCUL ET UNE ACCUMULATION DE COMPLEXITÉ ORGANISÉE

1 De nombreuses activités humaines sont assimilables à de la manipulation d'informations et donc à des formes de calcul. C'est le cas des activités de création artistique, mais aussi de la recherche scientifique ou mathématique. Bien sûr, les résultats de ces activités sont considérés comme ayant de la valeur et on cherche à les préserver de toutes les façons possibles : en les protégeant, en les multipliant (par exemple grâce aux livres), en les collectionnant (par exemple dans des musées).

De la même façon, on considère que les organismes vivants, qui résultent de longs processus évolutifs assimilables aussi à des calculs, doivent être protégés. La disparition d'une espèce est perçue comme une

perte, tout comme la destruction d'un écosystème fragile.

Il semblerait bien que dans l'esprit de nombreux individus, tout ce qui demande beaucoup de calcul pour se construire ou s'élaborer mérite d'être protégé. Non seulement les contenus en calculs que mesure la « profondeur logique de Bennett » croissent au fur et à mesure que le temps passe, mais ces contenus en calcul semblent avoir de la valeur. Prendre cette idée au sérieux conduit à une éthique de la complexité organisée.

Il est amusant de constater que l'idée que nous devons protéger la diversité du vivant (donc la profondeur logique du monde vivant) ne date pas d'aujourd'hui.

Elle était déjà présente dans le texte de la Bible avec l'histoire de Noé : « Entre dans l'arche, toi et toute ta famille, car je t'ai vu seul juste à mes yeux parmi cette génération. De tous les animaux purs, tu prendras sept paires, le mâle et la femelle ; des animaux qui ne sont pas purs, tu prendras un couple, le mâle et la femelle et aussi des oiseaux du ciel, sept paires, le mâle et la femelle, pour perpétuer la race sur toute la terre. Car encore sept jours et je ferai pleuvoir sur la terre pendant quarante jours et quarante nuits et j'effacerai de la surface du sol tous les êtres que j'ai faits. » (Genèse 7:1-4).



La bibliothèque du monastère de Strahov, à Prague.



L'Arche de Noé sur le mont Ararat, de Simon de Myle (1570).

mesure $K(Ob)$, dénommée complexité de Kolmogorov de Ob . Pour mémoriser un objet numérique, le mieux qu'on pourra faire est de réserver une mémoire de $K(Ob)$ bits d'information en y plaçant ce plus court programme. Le nombre $K(Ob)$ est le contenu en information de l'objet Ob .

Les objets aléatoires ont le plus grand contenu en information : pour les mémoriser, rien n'est sensiblement meilleur que d'en stocker la description non modifiée. En revanche, les objets structurés, par exemple la photo d'une ville ou d'un microprocesseur, la liste des nombres premiers jusqu'à 1 000 000, peuvent être compressés : leur contenu en information est plus petit que leur taille brute.

Puisque les objets aléatoires ont la plus grande complexité de Kolmogorov, cela signifie que cette notion de complexité ne mesure pas la richesse en structures d'un objet. Pour cela, l'Américain Charles Bennett a introduit en 1988

le concept de profondeur logique. C'est le nombre de pas de calcul qu'il faut pour reconstituer l'objet Ob à partir de la représentation compressée optimale de Ob . Plus un objet est structuré, plus il offre des moyens de le compresser, moyens qui, quand on les fait marcher à l'envers (la décompression), exigent de nombreux pas de calcul. La richesse en structures ou complexité organisée est donc assez bien mesurée par le temps de calcul nécessaire pour passer de la forme compressée optimale de Ob à sa forme explicite.

L'évolution cosmique est alors vue comme un processus de perfectionnement des outils exécutant rapidement des calculs et préservant les résultats de ces calculs dans des structures de plus en plus organisées, c'est-à-dire de profondeur logique de plus en plus grande.

Avec un peu de recul, on ne peut qu'être en accord avec cette interprétation de ce qui s'est passé dans les stades primitifs de l'Univers, ➤

> puis plus tard avec la formation des étoiles et des galaxies, et plus tard encore sur la Terre avec la vie. L'apparition des organismes vivants, des vertébrés supérieurs, des humains, de leurs cultures, de leurs technologies, sont des étapes du progrès à la fois dans la richesse en organisation du monde, et de la capacité des objets du monde à produire efficacement de nouvelles structures et à les préserver.

L'Univers est ainsi une sorte de gigantesque ordinateur se perfectionnant, produisant et préservant sans relâche des objets dont la profondeur logique s'accroît.

L'idée que l'évolution biologique doit être vue comme un calcul est en particulier défendue par John Mayfield, de l'université de l'État de l'Iowa, dans son livre de 2013, *The Engine of Complexity, Evolution as Computation*. Même si

On peut faire un parallèle entre le contenu en calcul que mesure la profondeur logique de Bennett et le concept d'«émergie» qu'a élaboré et défendu l'écologue américain Howard Odum. Pour un système vivant, social ou technologique, l'émergie est la quantité d'énergie qui a été nécessaire pour le créer. On ramène souvent cette énergie accumulée à de l'énergie solaire pour faciliter les comparaisons. De la même façon, la profondeur logique de Bennett mesure la quantité de calculs nécessaire pour obtenir l'objet à partir de son origine probable. Les deux concepts pourraient se retrouver et des conversions des évaluations de l'un en évaluations de l'autre seraient envisageables... si le coût énergétique du calcul était constant, ce qui n'est pas le cas, du fait des progrès spectaculaires de nos dispositifs électroniques de calcul.

Plus généralement, selon l'endroit de l'Univers pris en compte, l'énergie dépensée pour un calcul change considérablement. Par ailleurs, une grande quantité d'énergie peut être dépensée sans que rien n'en reste, si aucun dispositif de mémorisation n'est là pour protéger et conserver les résultats des calculs. Les molécules d'eau qui s'agitent dans la mer interagissent, ce qu'on peut assimiler à un immense calcul parallèle, mais les calculs s'effacent d'instant en instant et toute l'énergie correspondant à cette agitation ne laisse aucune trace.

La profondeur logique de Bennett est une mesure du travail de calcul nécessaire pour obtenir une structure, mais cette mesure ne prend en compte que les calculs dont les résultats persistent directement ou indirectement. Le contenu en calcul qui mesure la complexité organisée n'est pas évaluable en termes énergétiques: c'est autre chose!

CE À QUOI NOUS TENONS

Munis de ce concept de contenu en calcul et réfléchissant à la valeur des choses, nous constatons une forme de cohérence et d'unité dans ce que nous aimons et défendons.

La vie humaine est bien sûr une chose que nous souhaitons protéger. Chaque vie humaine est une richesse en expériences accumulées, en culture, en intelligence, ainsi qu'en capacités à produire ses propres objets complexes. L'art et la littérature créent des objets qui, soit directement, soit par la position qu'ils occupent dans les sociétés humaines, enrichissent l'information et la complexité structurelle. Chaque composition musicale nouvelle, par ses organisations de rythmes, d'harmonies, de mélodies enrichit les répertoires déjà connus et préservés.

Les sciences, en perfectionnant les rapports qui existent entre le monde et l'image que nous en avons, ainsi que nos moyens d'action construisent de nouvelles structures dans l'Univers. Ces structures s'affinent par la recherche, c'est-à-dire par l'organisation

L'Univers est une sorte de grand ordinateur qui accroît sans cesse la complexité organisée

les calculs de l'évolution et de la sélection naturelle sont assez différents de ceux qu'un ordinateur réalise, on sait bien, et c'est la clé de la biologie moderne, que les ADN et les ARN portent de l'information, la combinent, la copient et, sur le long terme, la modifient et en perfectionnent les contenus, faisant apparaître des organismes de plus en plus complexes par compétition et coévolution.

La pertinence du concept de profondeur logique en biologie est aussi défendue par Antoine Danchin et par Cédric Gaucherel, lequel a mené des expériences mettant en évidence l'accroissement de la profondeur logique dans la dynamique évolutive d'écosystèmes simplifiés.

La complexité de Kolmogorov, bien qu'elle constitue un concept clé pour penser le monde en termes informationnels, n'est pas utilisable directement pour parler de la «complexification» de l'Univers tels que les astrophysiciens et les biologistes la mentionnent. Ce n'est pas le contenu en information qui augmente au cours du temps (ce contenu est maximal pour les objets aléatoires), mais le contenu en structures mesuré par la profondeur logique de Bennett.

d'expérimentations, assimilables à des calculs, et des progrès des théories physiques et mathématiques, également assimilables à des calculs.

La plupart d'entre nous pensons que préserver les espèces menacées de disparition est une nécessité morale et qu'il est beaucoup plus grave de laisser une espèce disparaître que tuer un individu d'une espèce animale à la population prospère. Ce jugement moral correspond à un principe de maximisation de la profondeur logique de Bennett.

PRÉSERVER LA BIODIVERSITÉ, C'EST PRÉSERVER LA COMPLEXITÉ

En effet, la profondeur logique de Bennett de l'ensemble de la biosphère ne varie que très peu quand un individu d'une espèce nombreuse disparaît, alors qu'elle diminue sensiblement quand le dernier représentant d'une espèce meurt. Préserver la diversité animale, c'est préserver la complexité organisée sur Terre, c'est préserver sa profondeur logique. Quand Noé emplit son arche, il tente de conserver la diversité du monde animal et agit avec les moyens limités dont il dispose en ne prenant qu'un petit nombre de couples de chaque espèce.

Le principe écologiste plus général selon lequel nous devons préserver notre environnement est de même nature: la richesse des interactions des espèces animales et végétales d'un écosystème est une organisation que nous avons le devoir de préserver, car nous ne saurions pas la reconstituer (ou cela serait très difficile).

Détruire un livre dont il n'existe qu'un seul exemplaire, brûler des tableaux dont on n'a aucune copie, saccager ou démolir des monuments, des sculptures, des objets anciens témoins de civilisations disparues, tout cela nous semble éthiquement incorrect. Tout ce qui contribue à faire baisser la complexité organisée du monde est, dans l'esprit de la plupart des humains, une mauvaise chose.

À l'inverse, créer, conserver, collectionner est considéré comme une bonne chose pour la majorité d'entre nous. Nous dépensons de l'argent et des moyens pour que les œuvres d'art anciennes soient collectées, restaurées, soigneusement répertoriées, photographiées et rangées, par exemple dans nos musées. Sans le formuler explicitement, nous cherchons à protéger et à augmenter la complexité organisée du monde.

UNE ÉTHIQUE DE LA COMPLEXITÉ ORGANISÉE

Il résulte de cette analyse la formulation d'une éthique universelle de la complexité organisée: le bien, c'est conserver, créer et contribuer à faire croître la complexité organisée, c'est-à-dire les contenus en calculs de l'Univers mesurables par la profondeur logique.

À la suite de Charles Bennett, Clément Vidal et moi cherchons à préciser cette

2

Isaac Asimov
(1920-1992)



DES VALEURS AU-DELÀ DE L'HUMAIN ?

Les lois et la morale protègent les vies humaines, et un peu moins les vies animales et la variété des richesses végétales. Mais peu à peu s'impose l'idée qu'une éthique ouverte doit aller au-delà de l'être humain et se préoccuper de la vie dans son ensemble.

L'antisépécisme, l'écologie politique proposent des valeurs qui ne s'arrêtent pas aux humains. Par ailleurs, l'idée qu'il est immoral de détruire les œuvres du passé (livres, monuments, peintures et sculptures en exemplaires uniques) confirme que nous avons une conception éthique reconnaissant une valeur à tout ce qui résulte d'un travail important d'élaboration ou de calcul (êtres vivants, œuvres d'art, théories scientifiques...).

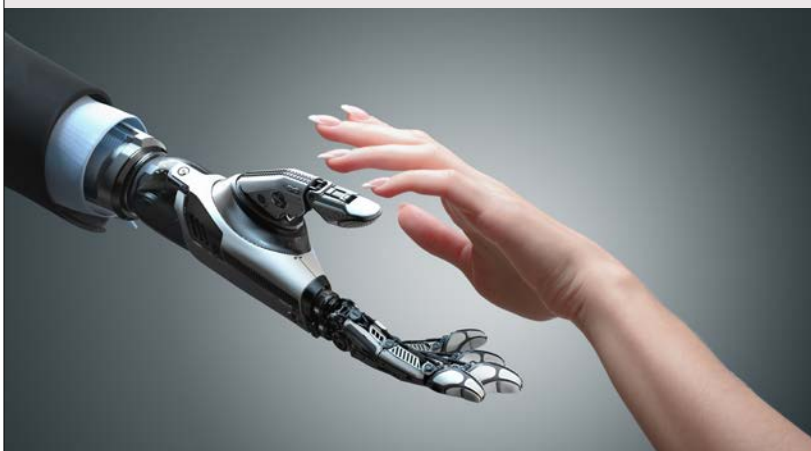
Cette éthique de la complexité organisée, appliquée aux robots intelligents, proposera autre chose que les trois lois de la robotique imaginées par Isaac Asimov :

1. Un robot ne peut porter atteinte à un humain ni, en restant passif, permettre qu'un humain soit exposé au danger.
2. Un robot doit obéir aux ordres qui lui sont donnés par un humain, sauf si de tels ordres entrent en conflit avec la première loi.

3. Un robot doit protéger son existence tant que cette protection n'entre pas en conflit avec la première ou la deuxième loi.

Une éthique de la complexité organisée ne demandera pas aux robots intelligents, quand ils existeront, d'être nos esclaves (ce que fait Asimov), mais leur demandera de respecter tout ce qui contient les traces d'un long processus d'élaboration ou, dit dans le langage de Charles Bennett, tout ce qui contient beaucoup de profondeur logique. De plus, une telle éthique sera disposée à attribuer aux robots eux-mêmes une valeur exigeant un respect, comme on en doit aux humains et aux autres êtres vivants. Si un jour se produisait une rencontre de l'humanité avec d'autres formes de vie, une éthique de la complexité organisée nous commanderait de les respecter et leur commanderait de nous respecter.

L'universalité de cette éthique de la complexité organisée susceptible de s'appliquer aux robots intelligents comme à d'autres formes de vie nous ferait partager avec eux une vision morale, ce qui serait un bon point de départ.



3

LES CHANGEMENTS PROFONDS DU COSMOS

> éthique qui pourrait servir de terrain d'entente et de rencontre à un grand nombre de morales. L'idée d'une éthique liée à l'information avait déjà été défendue, sous une forme un peu différente, dès 2003 par le philosophe italien Luciano Floridi. Il tentait de distinguer l'information utile ayant pour lui de la valeur et qu'on doit considérer comme un bien, de l'information inutile comme celle contenue dans une suite de tirages aléatoires. Malheureusement, sans le concept de profondeur logique, il ne pouvait donner à ses intuitions le caractère rigoureux maintenant devenu possible grâce aux avancées mathématiques de Charles Bennett.

Personne ne peut démontrer une éthique et nul ne prétend démontrer celle de la complexité organisée. Ses défenseurs remarquent cependant plusieurs points en sa faveur.

Elle est déjà présente dans une grande majorité de systèmes moraux et éthiques; elle pourrait donc rassembler un grand nombre de personnes sur un même terrain d'entente. Et elle promeut des principes universels selon deux sens complémentaires.

UN SOCLE COMMUN AUX DIVERS SYSTÈMES ÉTHIQUES?

D'une part, l'éthique s'oppose aux nationalismes, aux « spécismes » (la croyance que certaines espèces méritent de la considération, à l'exclusion de toutes les autres) et aux morales étroites n'accordant de la valeur qu'à des êtres ou objets très particuliers. Elle promeut une idée généreuse et large de ce qui doit être préservé et encouragé.

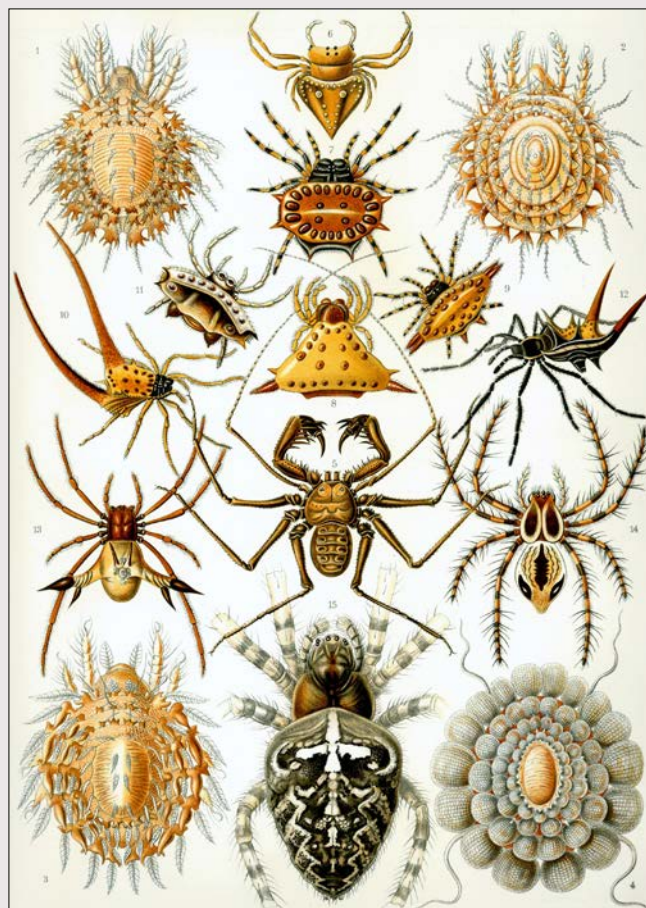
D'autre part, elle peut être adoptée par tous les êtres doués d'autonomie et ayant des

On a cherché à identifier ce qui, au cours du temps, pourrait mesurer la complexification de l'Univers, illustrée ici par une gravure du biologiste allemand Ernst Haeckel. Eric Chaisson, de l'université Harvard, propose une idée thermodynamique : selon lui, le niveau de complexité des structures physiques s'évalue par la dissipation d'énergie libre par unité de masse. Cette mesure semble pertinente pour certains objets, mais pas pour nos objets technologiques récents. Nos ordinateurs ont une dissipation d'énergie libre par unité de masse qui évolue peu au fil des décennies, alors que leur puissance de calcul et de mémorisation de l'information augmente considérablement et que, de toute évidence, ils sont devenus plus complexes.

Certains argumentent d'ailleurs qu'une mesure de complexité d'organisation ne doit pas se fonder sur la thermodynamique : une partition de musique complexe l'est indépendamment de tout concept d'énergie, et il en est de même d'un théorème mathématique ou d'un programme calculant les nombres premiers. Il n'y a pas non plus de différence thermodynamique claire entre un ordinateur qui répète un milliard de fois le calcul $1 + 1 = 2$ et un ordinateur qui parvient à prouver un théorème difficile. Pourtant, l'un est simple à concevoir et ne produit rien d'utile, tandis que l'autre est incomparablement plus complexe et organisé et donne d'intéressants résultats.

Charles Bennett a donc proposé une autre mesure de complexité organisée : la profondeur logique. En première approximation, pour un objet donné, c'est le temps qu'il faut pour décompresser la meilleure version compressée des informations décrivant l'objet (voir le texte principal, page 83). Avec cette notion qui s'affranchit de la physique, une nouvelle compréhension de l'évolution cosmique et du monde vivant devient possible.

Le Prix Nobel de physique Murray Gell-Mann croit lui aussi que l'existence de structures complexes n'est pas directement liée à la thermodynamique. Il écrit : « Le deuxième principe de la thermodynamique exige une augmentation de l'entropie moyenne (ou désordre), mais n'interdit nullement à l'ordre local de se produire par divers mécanismes d'autoorganisation : ceux-ci figent certains accidents et produisent des régularités qui peuvent alors se diffuser. » Ces accidents figés sont comme des calculs que l'Univers mémorise. Ce qui change au cours du temps dans l'Univers, c'est sa capacité à calculer et à mémoriser les résultats de ses calculs, ou, en termes de l'idée de Bennett, c'est la profondeur logique de l'Univers qui s'accroît.



L'une des nombreuses et magnifiques planches du naturaliste et libre penseur allemand Ernst Haeckel (1834-1919), dont cent ont été publiées dans ses *Formes artistiques de la nature* (*Kunstformen der Natur*).

décisions à prendre, que ce soient des humains, des animaux, des extraterrestres (s'il en existe) ou même des robots.

À une époque où nous commençons à envisager que nous aurons à vivre avec des êtres intelligents de nature différente de la nôtre, il est intéressant de savoir qu'une éthique de formulation simple, qui n'est pas centrée uniquement sur l'être humain comme le sont les lois de la robotique d'Asimov (*voir l'encadré 2*), est possible. L'idée que nous aurons peut-être à nous entendre avec d'autres mondes vivants que celui de la Terre et qu'il faudra donc partager des valeurs avec eux et penser le bien et le mal sans le référer uniquement aux humains ou au monde vivant d'ici rend aussi cette éthique intéressante. Elle va dans le sens de l'élargissement des considérations morales récentes, qui exigent que nous préservions le monde environnant et que nous cessions de le dégrader en faisant comme si seuls les humains comptaient.

ÉVALUER LA COMPLEXITÉ ORGANISÉE N'EST PAS SI FACILE

Bien que l'idée générale soit simple et repose sur un concept mathématique, tout ne devient pas facile pour autant. Celui qui adoptera cette éthique de la complexité organisée devra affronter au moins trois obstacles.

Premièrement, la complexité organisée n'est pas facile à évaluer. Même si notre intuition nous permet souvent de savoir où réside cette complexité, les comparaisons restent délicates : qui peut juger que telle musique contient une richesse en structures plus grande que telle autre ? De plus, même si une définition mathématique existe, il n'est pas facile d'en tirer des outils de mesure précis, car toute tentative de mesure rencontre l'obstacle de l'explosion combinatoire des calculs à mener : mesurer un contenu en calcul en demande énormément !

Deuxièmement, il n'est pas clair si l'on doit chercher à rendre maximale la complexité organisée du monde, ou la complexité organisée moyenne dans le monde. Cela ne revient pas au même : dans un cas, on évitera toute recopie, dans l'autre on accordera beaucoup d'importance à la circulation, à la diffusion et à la multiplication des copies d'une structure complexe. D'autres problèmes de ce type se posent.

Troisièmement, face à un choix entre plusieurs actions, déterminer celle qui satisfera le mieux le principe de maximisation de la complexité organisée ne sera pas évident puisqu'il faudra anticiper les effets du choix, et donc faire des paris sur les chaînes causales enclenchées par les diverses options.

Toutefois, ces difficultés ne rendent pas impossible ou absurde l'adoption d'une

éthique de la complexité organisée. Les trois problèmes mentionnés existent aussi pour toute autre éthique. Imaginons par exemple que l'on considère que le bien est tout ce qui contribue au bonheur humain, idée assez souvent acceptée implicitement en politique et dans bien des esprits. Prendre au sérieux une telle éthique humaniste du bonheur et vouloir l'appliquer avec rigueur obligerait à disposer de définitions claires de ce qu'est le bonheur humain et des outils pour le mesurer. Ce n'est évidemment pas le cas : il n'existe pas de méthodes faisant l'unanimité pour évaluer le bonheur humain, dont d'ailleurs chacun a sa propre conception.

Celui qui prendrait comme but le bonheur humain, même s'il savait l'évaluer, aurait aussi à choisir entre maximiser le bonheur moyen des humains, ou le bonheur du plus malheureux, ou le bonheur du plus heureux (option peu probable, vers laquelle on se demande pourtant si ce n'est pas ce vers quoi tendent nos sociétés). Ces questions liées au partage des richesses, on le sait, ne font pas l'unanimité et sont au contraire le sujet de disputes politiques de toutes sortes.

Face à chaque décision à prendre, reste aussi à prévoir ce qui résultera à moyen et long termes des diverses options et leurs conséquences pour le type de bonheur humain qu'on aura choisi de favoriser. C'est le problème d'anticipation des effets.

On le voit, les trois difficultés mentionnées que rencontre une éthique de la complexité organisée ont leur contrepartie exacte pour une éthique du bonheur humain. Les objections à faire à une éthique de la complexité organisée ne peuvent donc pas porter sur la difficulté qu'il y a à la mettre en œuvre, qui n'est pas supérieure à la difficulté que rencontrent d'autres éthiques.

Répetons-le, une éthique ne se démontre pas, elle n'est pas un fait, vrai ou faux, elle est juste une conception qu'on adopte ou non pour choisir ce qu'on fera, et déterminer ce que sont le bien et le mal. Les réflexions dans lesquelles on se trouve engagé en envisageant une éthique de la complexité organisée méritent certainement qu'on les approfondisse, surtout qu'elles nous amèneraient à une morale élégante et aux visées autorisant mieux des dépassements de soi que les morales strictement humanistes ou centrées sur des valeurs étroites.

Un nouveau défi s'offre à tous : concevoir pour nous et nos descendants des idéaux moraux scientifiquement fondés et aussi universels que possible, accordant de la valeur aux humains, à la vie en général, aux arts et aux sciences et qui soient adaptés à un monde élargi de robots et peut-être de vies différentes de la vie terrestre. ■

BIBLIOGRAPHIE

J.-P. Delahaye et C. Vidal, **Organized complexity : Is big history a big computation ?**, *APA Newsletter on Philosophy and Computers*, vol. 17(2), pp 49-54, 2018 (<https://bit.ly/2MohCIV>).

J.-P. Delahaye et C. Vidal, **Universal ethics : Organized complexity as an intrinsic value**, dans G. Yordanov et al. (éd.), *Evolution, Development and Complexity : Multiscale Evolutionary Models of Complex Adaptive Systems*, Springer, 2018 (<https://doi.org/10.5281/zenodo.1172976>).

C. H. Bennett, **Evidence, computation, and ethics**, *Simons Symposium on Evidence in the Natural Sciences*, 2014 (<https://bit.ly/2zqIpwk>).

C. Gaucherel, **Ecosystem complexity through the lens of logical depth : Capturing ecosystem individuality**, *Biological Theory*, vol. 9(4), pp. 440-451, 2014.

C. H. Bennett, **Logical depth and physical complexity**, dans R. Herken (éd.), *The Universal Turing Machine : A Half-Century Survey*, pp. 227-257, Oxford Univ. Press, 1988 (bit.ly/PLS491_Delahaye).

L'AUTEUR



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

LISEZ-VOUS LE RONGORONGO ?

L'ancienne écriture de l'île de Pâques réunit divers signes: poissons, hommes-oiseaux, croissants de lune... L'un d'eux correspond au pectoral en bois sculpté que portait l'élite de la société pascuane. Une exposition à Figeac fait le point sur ce que l'on sait de cette écriture, toujours indéchiffrée.

D

e l'île de Pâques, on ne retient le plus souvent que les moais, ces grandes statues de pierre, et les mésaventures des Pascuans, prétendument obligés de quitter leur île après en avoir épuisé les ressources. Rien n'est plus réducteur, voire erroné. Trois expositions rétablissent la vérité, battent en brèche les idées reçues et mettent en avant la richesse de la culture pascuane. Elles se répartissent entre trois villes d'Occitanie: Figeac, Rodez et Toulouse, chacune avec sa spécificité.

Dans la ville rose, au Muséum, place à la climatologie, la géologie, l'ethnologie...

pour raconter, à l'aune des dernières découvertes scientifiques l'histoire de l'île. À Rodez, le musée Fenaille met en avant une statuaire et un univers de représentations encore trop méconnu. On peut y voir un *reimiro*, un ornement en bois, en forme de croissant dont les extrémités représentent des queues de cétacés (voir la photo ci-contre). Ce pectoral était porté par les aristocrates et par l'*ariki mau*, le chef suprême de l'île.

Certains *reimiro* arborent des signes, des sortes de hiéroglyphes, semblables à ceux que l'on trouve notamment sur des tablettes gravées. Mais plus encore, le *reimiro* semble parfois être l'un de ces signes! De quoi parle-t-on? Du *rongorongo*, l'écriture encore non déchiffrée de l'île de Pâques. Pour comprendre, direction la troisième exposition, au musée Champollion de Figeac, consacrée à cette écriture qui défie encore les linguistes. Ils n'en ont pas moins élucidé certains mystères que les commissaires, Konstantin Pozdniakov, de l'Institut national des langues et

Ce pectoral en bois sculpté est aussi l'un des signes de l'écriture de l'île de Pâques.



civilisations orientales (Inalco) et Paul Horley, de la Société des océanistes et de l'Easter Island Foundation, donnent à voir.

L'écriture a été découverte en 1864 par Eugène Eyraud, le premier missionnaire chrétien à avoir foulé le sol de l'île. Selon ses dires, les habitants en faisaient peu de cas et semblaient en avoir oublié le sens. Toujours est-il qu'on récupéra le plus possible de témoignages pour constituer aujourd'hui un ensemble de... 26 textes seulement, pour un total d'environ 14000 signes, ou glyphes.

Que sait-on du *rongorongo*, une écriture sans lien avec aucune autre? En 1873, l'évêque de Tahiti, Tepano Jaussen,



découvrit avec l'aide d'un Pascuan qu'elle se lit en boustrophédon (comme un bœuf laboure un champ) inversé. La première ligne se lit de gauche à droite, puis on tourne la tablette de 180° pour lire la ligne suivante dans le même sens. C'est unique!

Une autre découverte importante eut lieu dans les années 1930, quand deux lycéens de Leningrad (aujourd'hui Saint-Petersbourg), en Russie, se rendirent compte de plusieurs répétitions dans les textes. On mit alors au jour des variations de glyphes ainsi que des ligatures, c'est-à-dire quand deux signes sont combinés en un seul, ce qui permit de dresser un catalogue exhaustif. Peu après la Seconde

Guerre mondiale, certains proposèrent de voir des généalogies sur des tablettes. Plus récemment, on a identifié des représentations de calendriers, avec notamment le glyphe d'une pleine lune, un cercle, avec à l'intérieur, un homme assis sur une petite montagne. Étonnamment, ces motifs correspondent assez bien aux mers lunaires!

Grâce aux travaux de Konstantin Pozdniakov, et de son père, les quelque 600 signes reconnus auparavant ont été réduits à seulement 52 signes indépendants, dont le pectoral. Plus encore, leurs travaux, fondés sur des analyses statistiques, tendent à montrer que le *rongorongo* serait en grande partie une écriture syllabique.

Enfin, des études récentes ont révélé que les scribes faisaient beaucoup d'erreurs dans les dessins préparatoires à la gravure des signes. Les analyses continuent et peut-être un jour comprendra-t-on le *rongorongo*. Et vous? Vous en savez désormais (presque) autant que les spécialistes, vous pouvez alors vous rendre à Figeac et essayer à votre tour de déchiffrer le *rongorongo*! ■

Les trois expositions consacrées à l'île de Pâques, dont celle de Figeac, jusqu'au 4 novembre 2018 : www.iledepaquesexpo.fr



Retrouvez la rubrique
Art & science sur
www.pourlascience.fr

LES AUTEURS



JEAN-MICHEL COURTY et ÉDOUARD KIERLIK
professeurs de physique à Sorbonne Université, à Paris

FAIRE D'UN SMARTPHONE UN MICROSCOPE PERFORMANT

Réaliser sur le terrain des observations microscopiques de qualité avec un simple téléphone portable est désormais possible – et à la portée de toutes les bourses.

Faire un examen microscopique d'une goutte de sang en pleine jungle quand on soupçonne une crise de paludisme? Jusque récemment, c'était impossible sans du matériel coûteux, encombrant et fragile. Mais cela va changer. Car en associant à un smartphone un dispositif optique approprié, petit et réalisable à peu de frais avec une imprimante 3D par exemple, on peut obtenir un microscope mobile de bonne qualité et ayant la résolution requise, de l'ordre du micromètre.

Comme la plupart des autres microorganismes, le parasite responsable du paludisme a une taille de l'ordre de quelques micromètres. Impossible donc à observer à l'œil nu: avec un pouvoir de résolution angulaire de l'ordre de 1 minute d'arc, l'œil parvient tout juste à distinguer des détails d'au moins 50 micromètres (ou 0,05 millimètre).

Une loupe grossissant dix fois ne suffit pas, et il faut donc s'orienter vers un instrument d'optique plus perfectionné, le microscope.

COMBINER DEUX LENTILLES

Un microscope optique comporte en général un objectif qui permet d'obtenir une image agrandie mais inversée d'un objet, que l'on regarde ensuite sans accommoder à travers une loupe appelée oculaire (voir l'encadré page ci-contre). En combinant ainsi les grossissements des deux lentilles (ou systèmes de lentilles), on atteint facilement les valeurs suffisantes ($\times 100$ ou $\times 400$, voire plus) pour observer des microorganismes.

Or les téléphones portables d'aujourd'hui intègrent un appareil photo de bonne qualité. Ne suffit-il pas d'ajouter à un tel appareil un «objectif» pour le transformer en microscope? Et de s'inspirer de Manu Prakash, à l'université



Stanford, qui a utilisé une toute petite bille de verre, peu coûteuse, pour réaliser un microscope-origami (voir la bibliographie)?

Hélas, l'une des difficultés en microscopie est d'obtenir une bonne résolution sur un champ de vision large, ce qui demande de corriger les aberrations: aberrations chromatiques liées à la présence de différentes longueurs d'onde dans la lumière que les verres dispersent comme dans un prisme, aberrations géométriques dues aux rayons qui sont très inclinés par rapport aux surfaces des lentilles et qui vont rendre floue l'image. Ce dernier point est en pratique rédhibitoire