

## BIBLIOGRAPHIE

N. Gauvrit et al., **Human behavioral complexity peaks at age 25**, *PLoS Comput. Biol.*, vol. 13(4), e1005408, 2017.

N. Gauvrit et al., **A preference for some types of complexity comment [...]**, *Acta Psychologica*, vol. 174, pp. 48-53, 2017.

N. Gauvrit et al., **Algorithmic complexity for psychology [...]**, *Behav. Res.*, vol. 48(1), pp. 314-329, 2016.

H. Zenil et al., **Two-dimensional Kolmogorov complexity [...]**, *PeerJ Comp. Sci.*, vol. 1, e23, 2015.

N. Gauvrit et al., **Algorithmic complexity for short binary strings applied to psychology [...]**, *Behav. Res.*, vol. 46(3), pp. 732-744, 2014.

F. Soler-Toscano et al., **Calculating Kolmogorov complexity [...]**, *PLoS One*, vol. 9(5), e96223, 2014.

J.-P. Delahaye et H. Zenil, **Numerical evaluation of the complexity of short strings [...]**, *Applied Math. and Comput.*, vol. 219, pp. 63-77, 2012.

H. Zenil et J.-P. Delahaye, **On the algorithmic nature of the world**, dans G. Dodig-Crnkovic & M. Burgin (eds.), *Information and Computation*, pp. 477-496, World Scientific, 2010.

faut inhiber ce réflexe pour créer de la complexité. Nous savons par ailleurs que ces fonctions cognitives de haut niveau reposent principalement sur le lobe frontal du cerveau. C'est pourquoi les neurologues demandent parfois au patient qui a subi un choc à la tête de produire une suite de chiffres la plus aléatoire possible. Si la région cérébrale est endommagée, le patient aura du mal à créer de la complexité et la suite présentera de nombreuses répétitions.»

Hector Zenil, l'un des organisateurs de la large étude, considère que la capacité à produire des suites complexes est aussi directement corrélée à la créativité, car celle-ci exige de produire de l'inattendu, ce qui est lié à la capacité d'accéder à chaque instant à un ensemble ouvert et large d'éventualités. Pour lui, cette étude doit aussi s'interpréter comme une évaluation de la créativité en fonction de l'âge.

Voyons quelques détails sur le protocole utilisé. Les sujets ont été invités à répondre à cinq exercices liés aux séquences aléatoires. On a évalué leurs réponses en considérant la complexité des séquences courtes qu'ils produisaient.

**Exercice a.** Les participants doivent créer une série de 12 «pile ou face» pour qu'elle semble aléatoire à quelqu'un d'autre. Ils choisissent sur un écran qui leur propose de manière répétée les deux options. Seul le dernier choix opéré reste visible quand ils effectuent un nouveau choix.

**Exercice b.** Dix fois de suite, les participants doivent sélectionner 5 cartes dans un jeu en tentant de faire comme si elles provenaient d'un jeu parfaitement mélangé.

**Exercice c.** Les participants doivent engendrer 10 nombres entiers compris entre 1 et 6, comme pourrait en produire un dé lancé 10 fois. Pour cette épreuve, les choix précédents restent visibles, mais ne peuvent pas être modifiés.

**Exercice d.** Les participants doivent pointer 10 fois de suite un petit cercle pris dans une série de 9 cercles présentée à l'écran, en choisissant au hasard.

**Exercice e.** Les participants doivent noircir des cases d'une grille 3×3 initialement blanche, de façon que la grille finale semble aléatoire. Ici, les participants sont autorisés à revenir en arrière sur leur choix jusqu'à en être satisfaits.

À chaque fois, on mesure à la fois la complexité des choix faits et le temps mis pour les faire. Comme le note l'article rapportant cette expérience, celle-ci est un «test de Turing inversé». On ne demande pas à un système informatique d'imiter les réponses que donnerait un humain pour savoir si on peut qualifier le système d'intelligent (c'est l'idée du célèbre test de Turing); on considère, à l'opposé, que c'est la capacité de l'humain à approcher ce que (collectivement) les machines de Turing nous disent de

la complexité qui mesure le niveau des aptitudes cognitives des personnes testées.

Malgré la nature variée des tâches demandées, la réussite des sujets évolue de la même façon en fonction de l'âge pour les cinq exercices: le niveau de réussite s'accroît jusqu'à 25 ans, puis décroît assez lentement jusqu'à 60 ans, âge à partir duquel le déclin s'accélère. L'analyse de la vitesse à laquelle les sujets répondent évolue de façon inverse: diminution des temps de réponse jusqu'à 25 ans, puis augmentation (voir l'encadré 4).

## CE QUI INFLUE... ET CE QUI N'INFLUE PAS

Les données collectées sur les participants ont permis d'analyser d'autres facteurs que celui de l'âge. Le sexe des participants n'a aucun effet significatif sur les résultats de la simulation du hasard. En revanche, les participants de sexe masculin répondent plus rapidement que ceux de sexe féminin. Cette différence avait déjà été notée dans d'autres études: les hommes semblent plus pressés que les femmes!

L'analyse montre que les réussites aux quatre premiers exercices sont fortement corrélées: réussir assez bien à l'un indique le plus souvent qu'on réussira bien aux autres. Le cinquième exercice est moins nettement corrélé aux autres, ce qui est peut-être dû à la possibilité donnée aux participants à cet exercice de revenir en arrière sur leurs décisions jusqu'à en être globalement satisfaits.

Le rapport entre réussite aux exercices et croyance au paranormal a été examiné. À cette fin, on a demandé aux participants de noter sur une échelle de 0 à 6 leur degré d'approbation de la phrase suivante: «Certaines coïncidences dont j'ai été témoin ne s'expliquent bien qu'en envisageant la perception extrasensorielle ou des forces paranormales.» L'idée était que quelqu'un n'ayant pas l'aptitude à bien évaluer et produire du hasard chercherait à expliquer des situations parfaitement banales du point de vue statistique en invoquant des considérations fondées sur l'intervention de forces paranormales. Aucune corrélation n'a été trouvée pour les quatre premiers exercices, et une légère corrélation négative est apparue pour le cinquième: les participants créent un peu moins bien des grilles complexes quand ils croient au paranormal.

## AUTRES APPLICATIONS

Terminons en mentionnant que, grâce à la mise à disposition des tables de complexité calculées par machines de Turing, plusieurs autres études ont pu être menées concernant la perception visuelle (voir l'encadré 2), la formulation des jugements esthétiques et la façon dont s'opère l'apprentissage d'un langage. ■

## L'AUTEUR



LOÏC MANGIN  
rédacteur en chef adjoint  
à Pour la Science

# UN HAVRE POUR LES ABEILLES

Au Havre, au cœur d'une exposition dédiée au génie des abeilles, des modèles façonnés en papier rendent compte de la diversité insoupçonnée de ces insectes.



La nomade jaune, *Nomada flava*,  
l'anthilde à manchettes *Anthidium manicatum* et l'abeille orchidée  
*Euglossa hemichlora* plus vraies  
que nature, mais en papier.

**E**n juin 2019, le chercheur Vincent Bretagnolle et ses collègues ont publié une étude montrant que l'agriculture biologique profite aux colonies d'abeilles mellifères, notamment pendant la période de disette à la fin du printemps. Au vu de l'engouement pour le bio et de l'expansion attendue des terres dévolues à ce type de produits, on peut se réjouir pour les abeilles. C'est certainement le cas d'Éric Tourneret, commissaire de l'exposition « Abeilles, une histoire naturelle », présentée au Muséum d'histoire

naturelle du Havre. On peut y voir de nombreuses photographies que ce spécialiste des abeilles a rapporté de dix années de reportages dans vingt pays. On découvre également les toutes dernières découvertes scientifiques sur ces insectes, aussi bien sur leur biologie (communication, prises de décision démocratique, performances cognitives, moyens de défense...) que sur les causes de leur déclin, à commencer par le rôle des pesticides.

Pour compléter l'exposition, l'artiste Hugo Boistelle a quant à lui façonné une série de vingt abeilles en papier illustrant la grande diversité des espèces (géantes ou naines, dotées d'un abdomen fin et long ou au contraire court et trapu...). De fait, les spécialistes en ont identifié plus de 20 000, dont plus de 1 000 en France ! Certes, on connaît l'abeille *Apis mellifera*, l'espèce dominante en apiculture : les ruches qui abritent ses colonies nous sont familières,

même au cœur des villes. Mais saviez-vous que plus de 1 000 espèces en France sont solitaires, c'est-à-dire qu'elles ne fondent pas de colonie sociale et hiérarchisée ? C'est notamment le cas (voir ci-dessus) de la nomade jaune *Nomada flava* et de l'anthilde à manchettes *Anthidium manicatum*. On peut aussi citer l'abeille orchidée *Euglossa hemichlora*, une solitaire qui vit quant à elle au Panamá.

On peut s'étonner que d'autres espèces soient sans dard : pourtant, dans le monde, environ 600 espèces sont dépourvues de cet aiguillon. Un héritage des caractères des abeilles ancestrales, celles qui sont apparues il y a 100 millions d'années, avant



la dérive des continents, ce qui explique qu'on les rencontre partout. Les abeilles à dard, dont *Apis mellifera*, se sont différenciées il y a seulement 20 millions d'années, probablement en Asie, puis ont gagné l'Europe, en passant par l'Afrique, il y a 4 millions d'années.

Comment s'y prend Hugo Boistelle pour confectionner ses abeilles en papier? À partir de feuilles à dessin noires, il dessine puis découpe une silhouette, une sorte de patron en deux dimensions de l'insecte. La troisième naîtra de pliages successifs. Les abeilles sont représentées à l'échelle 2: la *Nomada flava* fait ici près de 1,5 centimètre de longueur. Les effets de texture, de

gaufrage sont rendus par diverses techniques, de l'application d'un ongle à la pression d'un coquillage. À la fin, toutes les coupes franches de la silhouette initiale ont disparu. La touche finale consiste à coller les ailes, réalisées avec du papier-calque légèrement coloré en sépia. L'insecte est prêt à rejoindre, épinglé, sa boîte d'entomologiste qui sera exposée au public.

«Je souhaite que l'exposition apporte à ce dernier un regard nouveau sur cet insecte emblématique à travers les dernières découvertes scientifiques sur son génie», déclare Éric Tournier. Ses nombreux voyages en terres de traditions apicoles (avec les nomades d'Éthiopie, les

Pygmées de la République du Congo...) et les ravages constatés en certaines régions par des pratiques agricoles intensives l'ont convaincu d'une chose: «Il vaut mieux travailler avec la nature que contre». Surtout quand notre survie en dépend... ■

«Abeilles, une histoire naturelle»,  
au Muséum d'histoire naturelle du Havre,  
jusqu'au 10 novembre 2019.  
<http://www.museum-lehavre.fr>



L'auteur a publié:  
**Pollock, Turner, Van Gogh,  
Vermeer et la science...**  
(Belin, 2018)



## LES AUTEURS



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

# VERS L'HORIZON, ET AU-DELÀ!

**L'horizon géométrique n'est pas une fatalité :  
grâce à la réfraction atmosphérique, les rayons  
lumineux se courbent et permettent de voir plus loin.**

**T**out a commencé par une question apparemment élémentaire nous arrivant par courriel : « Comment se fait-il que la surface des océans est courbe alors que celle des lacs est plate ? Ne devrait-elle pas aussi être courbée ? » La réponse nous semblait évidente et nous avons donc répondu en substance : « Les lacs ont la même courbure que les océans, celle de la Terre. Mais comme ils sont bien moins étendus que les océans, leur courbure est difficile à percevoir. »

C'était sans compter sur la réponse très argumentée, relatant des observations précises, des mesures et des calculs numériques, qui nous est revenue quelques heures plus tard.

Notre interlocuteur avait observé, posté sur la rive du lac du Bourget avec un zoom placé à 0,51 mètre de hauteur, un muret d'un port de plaisance situé à l'autre bout du lac, à 16,7 kilomètres de distance. Ce muret était haut de 1,6 mètre.

Or les calculs montraient que, compte tenu de la courbure terrestre, il n'aurait dû voir que des structures dont la hauteur dépasse 15 mètres. Notre correspondant en déduisait que le lac était plat. Manifestement, il avait vu quelque chose qu'il n'aurait pas dû voir : il avait vu au-delà de l'horizon !

## JUSQU'OU PEUT PORTER NOTRE REGARD ?

Comment l'expliquer ? Évaluons tout d'abord la distance de l'horizon pour un observateur situé à une certaine hauteur  $h$  au-dessus de la surface de la Terre. Pour ce faire, on applique le théorème de Pythagore au triangle rectangle dont les sommets sont le centre de la Terre (C), la position de l'observateur (O) et le point de l'horizon (H) qu'il peut apercevoir (voir l'encadré page ci-contre, schéma du bas).

Résultat : la distance de l'horizon, OH, est à peu près égale à la racine carrée du double du produit de la hauteur d'observation par le rayon de la Terre, soit

$3,6\sqrt{h}$  kilomètres, la hauteur  $h$  étant exprimée en mètres.

Pour  $h=0,51$  mètre, on obtient 2,6 kilomètres, une distance bien plus courte que celle de l'extrémité du lac, mais qui ne concerne que la visibilité au niveau de sa surface. Un objet d'une certaine hauteur peut en effet être vu par un observateur au-delà de son horizon à condition que leurs horizons respectifs (de l'observateur et de l'objet) se recouvrent sur la ligne de visée et, à la limite, coïncident (voir l'encadré page ci-contre, en haut).

Est-ce le cas du muret du port mentionné dans le courriel ? Pour être visible par l'objectif à 16,7 kilomètres, la distance entre le muret et son horizon doit

