

propre voie, était ostensiblement absent lors de la conférence de Lecce. En mai 2019, son équipe a publié des travaux fondés sur l'intelligence artificielle.

Menés par Clifford Seth Parker, lui aussi de l'université du Kentucky, ces chercheurs se sont servi de répliques de papyrus pour entraîner un réseau de neurones artificiels (l'une des techniques de l'intelligence artificielle) à reconnaître l'encre déposée sur les papyrus. À l'aide de cet « apprentissage profond », le réseau neuronal parvient à reconnaître l'encre de papyrus même à partir des données produites par des microtomographies à rayons X industriels.

Les microtomographies, images tridimensionnelles de haute résolution, produites par ces machines contiennent ainsi des informations subtiles sur les différences structurelles entre l'encre et le papyrus. En raison du manque de contraste, ces différences ne sont pas visibles sur les images, mais l'algorithme d'intelligence artificielle finit cependant par obtenir des informations utiles, à condition qu'il ait pu être entraîné avec suffisamment d'exemples de « contrastes morphologiques » liés à l'encre.

Ces essais ont pour le moment seulement démontré que le logiciel reconnaît de l'encre déposée en plusieurs couches, mais son principe n'en est pas moins prometteur. En octobre 2019, lors d'une conférence à Malibu, Brent Seales a annoncé que son algorithme a été en mesure de reconnaître une petite lettre apparente sur un fragment de papyrus, à partir de sa microtomographie.

Le chercheur a aussi utilisé le rayonnement synchrotron, plus efficace, pour examiner pour la première fois des rouleaux de papyrus d'Herculanum. Pour qu'il puisse les étudier à la Diamond Light Source, un synchrotron des environs d'Oxford, en Angleterre, l'Institut de France lui en a prêté deux. Les subtils signaux à analyser devraient se révéler davantage détectables dans les tomographies réalisées avec le synchrotron qu'avec un microtomographe. L'exploitation des données prendra plusieurs mois, d'autant que le développement de l'algorithme de lecture, qui doit être entraîné avec une énorme quantité d'exemples, est loin d'être terminé.

Savoir si les rouleaux de papyrus récupérés pourront être lus par l'une des méthodes non destructives joue un rôle déterminant dans la discussion sur l'opportunité de continuer à fouiller la villa des Papyrus. Les fouilleurs d'Alcubierre avaient trouvé les documents en partie dans de petits coffres et en partie dans des *capsae*, des boîtes servant à leur transport. Certains se trouvaient au sol, ce qui est peut-être lié à la façon dont l'avalanche de boue a pénétré les pièces. La plupart furent toutefois découverts sur les étagères équipant les murs d'une petite pièce dépourvue de fenêtre.

À la fin du ^{xviii} siècle, l'ingénieur suisse Karl Weber a relevé les tunnels et établi le plan d'un étage de la villa (voir la figure page 70-71). Les emplacements présumés des découvertes y sont notés. Il est évident qu'on ne lisait pas les papyrus dans la petite pièce. Les salles de lecture et les salles de stockage des ouvrages devaient donc être séparées. Les rouleaux qui venaient d'être lus se trouvaient probablement dans des *capsae* ou des commodes meublant les pièces éclairées. L'existence d'une salle contenant plus de cinquante chaises disposées en demi-cercle – une salle de réunion sans doute – va dans ce sens.

LA BIBLIOTHÈQUE TOUJOURS SOUS TERRE ?

On suppose aujourd'hui que la plupart des textes – ceux rédigés en grec et relatifs à Philodème – furent découverts dans la petite réserve, tandis que les textes latins le furent dans des *capsae* au sein des salles de lecture. Les différences observées dans les états de conservation des différents rouleaux plaident en ce sens. La petite salle était donc peut-être une sorte d'archive commémorative de Philodème, un centre philologique pour les érudits. De fait, certains des livres de Philodème y étaient disponibles dans des versions similaires. Certains textes comportent aussi des commentaires éditoriaux, ce qui suggère qu'il s'agit des premiers jets de Philodème, même si celui-ci est mort plus d'un siècle avant l'éruption du Vésuve.

En même temps, d'autres indices suggèrent que la bibliothèque principale, celle dont provenaient les textes contenus dans les *capsae*, n'est pas encore découverte. Les fouilles menées dans les années 1990 ont mis au jour deux étages supplémentaires, inconnus en 1750. La plus grande découverte de textes antiques jamais faite depuis la Renaissance nous attend-elle dans la boue pétrifiée qui remplit cette partie du bâtiment ?

En 1999, le surintendant de l'administration des biens culturels, Pier Giovanni Guzzo, a stoppé les fouilles en arguant que les travaux sur les rouleaux déjà exhumés étaient prioritaires. Le chantier de fouille est donc à l'arrêt, mais il a créé une tranchée de 30 mètres de profondeur, qui est aujourd'hui menacée de remplissage par la nappe phréatique. Des pompes ont été installées. Reste à savoir si cela protégera de l'eau la bibliothèque située dans la roche adjacente, si elle existe, et aussi à savoir si l'on pourrait aménager un tunnel pour atteindre les livres enfouis.

Il y a quelques années, Pier Giovanni Guzzo a fait savoir que l'on essaierait des « méthodes de sauvetage non conventionnelles ». Rien ne s'est produit cependant, avec l'argument que si la bibliothèque est en sécurité, mieux vaut la laisser tranquille. Pour le moment, après tout, les rouleaux exhumés continuent à se décomposer et l'on ne sait toujours pas les lire... ■

BIBLIOGRAPHIE

C. S. Parker et al., **From invisibility to readability : Recovering the ink of Herculanum**, *Plos One*, vol. 14(5), e021 5775, 2019.

P. Tack et al., **Tracking ink composition on Herculanum papyrus scrolls : Quantification and speciation of lead by X-ray based techniques and Monte Carlo simulations**, *Scientific Reports*, vol. 6, article 20763, 2016.

V. Mocella et al., **Revealing letters in rolled Herculanum papyri by X-ray phase contrast imaging**, *Nature Communications*, vol. 6, article 5895, 2015.

B. Seales, **Lire sans détruire les papyrus carbonisés d'Herculanum**, *Comptes rendus des séances de l'Académie des Inscriptions et Belles-Lettres*, vol. 153(2), pp. 907-923, 2009.



L'urubu à tête rouge *Cathartes aura*, tel que le voyait Jean-Jacques Audubon dans *The Birds of America* (1840). Ce vautour fut au cœur de la controverse autour de l'odorat des oiseaux qui opposa l'ornithologue à l'explorateur Charles Waterton.

L'ESSENTIEL

> Si Aristote et Plin l'Ancien pensaient que les oiseaux ont un odorat, les naturalistes du XIX^e siècle étaient beaucoup plus sceptiques.

> Il fallut attendre 1964 pour qu'un ornithologue prouve que l'urubu à tête rouge repère bien les cadavres à l'odeur...

> ... Et encore plusieurs dizaines d'années pour découvrir que certains oiseaux sont même capables de retrouver leur nid à des centaines de kilomètres grâce à leur odorat.

L'AUTEUR



BENOÎT GRISON
enseignant-chercheur
de l'UFR Sciences et techniques,
à l'université d'Orléans

Du flair de Waterton à l'odorat des oiseaux

Les vautours repèrent-ils les carcasses à l'odeur? En 1826, cette question fut le point de départ d'une controverse qui ne trouva son dénouement que ces dernières années.

Au début de son film *Les Neiges du Kilimandjaro* (1952), classique hollywoodien adapté de Hemingway, Henry King met en scène Gregory Peck dans le rôle d'un écrivain désabusé, grand amoureux de l'Afrique. Victime d'un accident de safari, ce dernier est bloqué dans un camp de brousse, dans l'attente d'un avion qui tarde à venir. Sa jambe blessée risquant de se gangrener, il croit bien sa dernière heure venue... Et de contempler d'un œil impavide les vautours rôdant à proximité de sa tente, tout en s'adressant à sa compagne (Susan Hayward): «Les sales bêtes! Je me demande s'ils sont guidés par leur odorat ou par leurs yeux.»

C'est cette même interrogation qui a tracassé – quoique dans un contexte moins dramatique – les naturalistes puis les biologistes du comportement durant quelque deux cents ans. Si cette controverse est en train de se dénouer aujourd'hui, elle en dit long sur les présupposés et biais cognitifs de certains chercheurs qui font parfois obstacle à des avancées scientifiques.

De fait, la majorité des ornithologues a tenu durablement les oiseaux pour des créatures

dépourvues de tout odorat, «anosmiques» ou presque. Mais ces dernières décennies, des découvertes étonnantes ont démontré que beaucoup d'espèces aviennes ont «du nez», cette capacité perceptive jouant même un rôle crucial dans maints aspects de leur biologie.

D'AUDUBON À DARWIN

Durant la première moitié du XX^e siècle, les manuels de zoologie enseignaient avec constance que la vision et l'audition étaient les deux sens prédominants des oiseaux. En fait, leur acuité visuelle peut être sans égale parmi les vertébrés: certaines espèces possèdent deux fovéas et leur aptitude à discerner les couleurs est remarquable. Par ailleurs, l'oreille de beaucoup d'oiseaux est à même de détecter les infrasons. Enfin, des rapaces nocturnes peuvent, grâce à des neurones «bimodaux», traiter de façon intégrée à la fois les stimulations auditives et visuelles, localiser avec rapidité et précision des proies mouvantes. Toujours est-il que pendant longtemps, la seule exception notable concédée à la règle de l'«absence de flair» avienne était celle du kiwi, aptère (sans ailes) de Nouvelle-Zélande, animal nocturne et fouisseur, friand de lombrics >



Article publié avec l'aimable autorisation de la revue *Espèces*, après parution dans son n° 29, pp. 58-63, en septembre 2018, <https://especes.org>.

> qu'il détecte à l'odorat. Il faut dire que cette espèce est dotée d'un dispositif olfactif unique pour un oiseau: ses narines sont disposées à l'extrémité de son long bec effilé, et non à la base de celui-ci.

Si les naturalistes antiques, Aristote ou encore Plin l'Ancien, défendaient la réalité de l'odorat avien, une telle assertion commença à être mise en doute avec le développement de l'histoire naturelle. L'un des tout premiers, Jean-Jacques Audubon relança le débat scientifique sur la question. En 1826, l'ornithologue franco-américain croisa ainsi le fer au sujet des rapaces avec un autre naturaliste haut en couleur, l'explorateur britannique Charles Waterton. Ce dernier, grand connaisseur des forêts guyanaises, disait avoir souvent observé des urubus à tête rouge (*Cathartes aura*), de grands vautours américains, attirés par l'odeur de carcasses. Jugeant cette assertion totalement erronée, Audubon s'en prit avec véhémence à son collègue.

Si la réputation scientifique de Waterton était alors à son zénith (l'un des premiers, il avait expérimenté sur les effets physiologiques du curare), Audubon possédait un avantage indéniable sur son rival: il avait lui-même conduit des expériences sur des urubus. Utilisant, entre autres, des cadavres de porcs, il semblait avoir montré qu'une fois ces cadavres recouverts de végétaux, les urubus ne s'y intéressaient nullement. Son ami le révérend Bachman dupliqua ses expérimentations tout en améliorant leur rigueur. Malheureusement pour ses conclusions, Audubon semble avoir employé par erreur des individus d'une autre espèce que l'urubu à tête rouge, à savoir l'urubu noir (*Coragyps atratus*), d'apparence assez proche. Quant à Bachman, l'on sait aujourd'hui qu'il avait grandement sous-estimé les préférences alimentaires «exigeantes» de l'urubu à tête rouge: s'il en a la possibilité, celui-ci «récuse» les carcasses en décomposition (comme celles



Le kiwi, ici sur une planche issue de *The Genera of Birds* (1849), de George Robert Gray, a la particularité de porter ses narines à l'extrémité de son long bec. Pendant longtemps, on a pensé qu'il était le seul oiseau pourvu d'odorat.

Sur le terrain, le naturaliste excentrique britannique Charles Waterton était capable de toutes les audaces, comme le montre cette aquarelle de Robert Cruikshank (1827).



utilisées par le savant ecclésiastique), leur préférant de loin des dépouilles fraîches. Les expériences du révérend Bachman étaient donc entachées d'une absence de «validité écologique», pour parler comme les expérimentateurs actuels: elles confrontaient les rapaces à des situations irréalistes relativement à leurs comportements alimentaires en milieu naturel.

De toute manière, Charles Darwin fut prompt à souligner qu'il était hors de question d'étendre les résultats obtenus sur une espèce à l'ensemble des oiseaux, mettant en garde la communauté ornithologique contre un «biais de généralisation», dirait-on aujourd'hui. Lecteur d'Audubon, mais aussi admirateur de Waterton, Darwin fut amené, lors du périple du *Beagle*, à effectuer dans les Andes une expérimentation de terrain qui le fit douter de l'intervention de l'odorat dans l'alimentation du condor. Mais il conclut avec prudence que rien n'indiquait que d'autres espèces aviennes ne fussent pas dotées d'une olfaction fonctionnelle. D'autant plus que les travaux du grand anatomiste britannique Richard Owen montraient avec clarté le développement important à la fois du lobe olfactif et du nerf trijumeau (qui assure la transmission d'informations sensorielles des cavités nasales au cerveau) chez *Cathartes aura*... Néanmoins, il fallut attendre 1964 pour que l'ornithologue californien Kenneth Stager mette en évidence les biais méthodologiques entachant les expériences du XIX^e siècle, et démontre définitivement le «flair» exceptionnel de l'urubu à tête rouge... que tous les vautours n'ont pas en partage. Cette modalité sensorielle est si



Grâce à ses narines tubulaires, l'albatros fuligineux (*Phoebastria palpebrata*) a un odorat très développé qui lui permet de repérer des zones de nourriture potentielle en mer.

développée chez *Cathartes aura* qu'aux États-Unis, les techniciens gérant les pipelines de gaz tiennent les attroupements d'urubus à tête rouge autour des canalisations comme un indicateur valide de fuite (les oiseaux étant attirés ici par les mercaptans, composés soufrés à l'odeur âcre que l'on ajoute au gaz inodore pour repérer tout écoulement hors des conduits).

Mais les arguments essentiels à l'encontre d'un odorat développé pour un grand nombre d'espèces aviennes demeuraient ceux des anatomistes du système nerveux : les oiseaux étant tenus alors pour des vertébrés au cortex à peine ébauché, les zones corticales dévolues au traitement des informations olfactives étaient censées occuper peu de place au sein de leur encéphale. Qui plus est, l'absence d'organe de Jacobson, prouvée chez la plupart des espèces, laissait supposer que l'odorat des oiseaux était moindre que celui de beaucoup

de « reptiles » : ces derniers possèdent souvent un tel organe (situé en avant de la fosse nasale) leur permettant de détecter des phéromones. À cela, certains objectaient néanmoins que plusieurs espèces aviennes sont dotées de cavités nasales volumineuses, avec une muqueuse olfactive reliée à un bulbe olfactif de très grande taille. C'est vers ces dernières espèces que les chercheurs se sont tournés il y a environ cinquante ans pour repenser le problème de l'olfaction des oiseaux sur de nouvelles bases.

LE FLAIR DU PÉTREL

Parmi lesdites espèces, des oiseaux de mer tels que les pétrels, albatros et autres puffins (Procellariiformes), semblaient être les meilleurs candidats à des aptitudes olfactives de haut niveau. C'est en tout cas ce que paraissait indiquer un grand nombre d'observations récurrentes. Ainsi les baleiniers d'autrefois étaient-ils surpris de la vitesse à laquelle une nuée de pétrels, « invisible » très peu de temps auparavant, se formait autour du cadavre d'une baleine qui venait d'être tuée. L'on pouvait soupçonner ici l'intervention d'un odorat à courte distance.

Des expérimentations ont pleinement confirmé l'existence de cette capacité. En Terre Adélie, Pierre Jouventin a conduit des recherches écoéthologiques sur le pétrel des neiges, utilisant des épreuves à choix multiples, fondées sur l'emploi de récipients opaques et partiellement clos, qui contenaient ou non de la nourriture : l'oiseau se dirige alors systématiquement vers ceux contenant du poisson. Finalement, chez certaines espèces marines, le développement olfactif aurait été sélectionné au cours de l'évolution en fonction de l'écologie alimentaire : les oiseaux à tendance charognarde ou détritivore, recherchant leur pitance au ras de l'eau, seraient plus susceptibles que d'autres de posséder un odorat développé. Ils suivraient des gradients d'odeurs, se maintenant au sein de la pellicule d'air localisée immédiatement au-dessus de la surface de la mer : c'est en effet à ce niveau que les odeurs se diffusent le mieux. Cela étant dit, l'océanographe américaine Gabrielle Nevitt a bien montré que le diméthylsulfure, gaz associé à une production intense de phytoplancton, et donc à la présence de proies éventuelles, peut également jouer un rôle d'indicateur olfactif pour les oiseaux de mer.

Au milieu des années 1990, un nouveau consensus régnait parmi les ornithologues : oui, certains oiseaux sont capables d'une olfaction véritable, mais seulement ceux dont la quête alimentaire s'effectue dans de (très) mauvaises conditions d'éclairement, ou qui recherchent surtout des proies dérobées à leur vue. La surprise fut donc grande quand on réalisa bientôt l'importance des capacités olfactives dans la vie d'espèces variées.

Des urubus attroupés autour de canalisations de gaz sont des indicateurs de fuite

> C'est à partir de 1996 que des naturalistes anglo-saxons démontrèrent le rôle central de l'odorat dans l'alimentation des poules domestiques, pourtant peu confrontées à des difficultés réelles dans leur recherche de nourriture. Des expériences élaborées, portant sur des centaines de poulets, ont été menées à cette époque par deux biologistes anglais, Tim Roper et Nicola Marples : ceux-ci confrontaient leurs sujets à trois types de situations successives. Le poulet découvre tout d'abord un récipient rempli d'une eau verte à odeur et goût d'amande amère, et quelques tentatives pour goûter au contenu suffisent à le dissuader de boire ce breuvage, devenu désormais un stimulus aversif. Ensuite, le même individu est placé devant une coupelle d'eau verte inodore : il la boit alors sans problème. Enfin, quand il est confronté à de l'eau bleue à odeur d'amande amère, il s'en écarte immédiatement sans même y toucher. Les résultats des chercheurs britanniques ont une portée réelle pour mieux comprendre l'écologie comportementale des oiseaux. Il semble en effet que certaines de leurs proies potentielles, alors qu'elles sont comestibles, sont susceptibles d'émettre les mêmes substances d'avertissement (dites « signaux aposématiques ») que celles, apparentées, qui sont véritablement toxiques...

CHOISIR SON PARTENAIRE

Plus surprenant encore, chez beaucoup d'espèces aviennes, l'odorat semble intervenir dans le choix des partenaires de reproduction. À cet égard, une étude décisive, coordonnée en 2014 par Richard H. Wagner, de l'institut d'éthologie Konrad-Lorenz, à Vienne, a mis en valeur le rôle central de la glande uropygienne, dont la sécrétion huileuse intervient dans le toilettage des oiseaux. La recherche, menée sur une population de mouettes tridactyles d'Alaska, a fait ressortir des constats capitaux : les composés uropygiens sécrétés sont bien caractéristiques des individus, engendrant des signatures olfactives propres à chacun ; plus l'odeur de l'un est distincte de celle de l'autre, plus les gènes du complexe majeur d'histocompatibilité (CMH, un ensemble multigénique au rôle immunitaire important) sont distincts entre individus. Or, les mâles et femelles qui s'appartient diffèrent systématiquement par leurs gènes CMH. Comme ils aiment à se renifler, l'on suppose qu'ils « évaluent » ainsi la distance génétique nécessaire pour éviter la consanguinité, et ce grâce à la différence de leurs signatures olfactives, qui se doit ici d'être marquée...

Le sens olfactif joue également un rôle avéré dans les soins apportés à la progéniture, au moins chez certains passereaux. En Corse, dans la vallée du Fango, Adèle Mennerat et Marcel Lambrechts, du Centre d'écologie



fonctionnelle et évolutive (Cefe), à Montpellier, et leurs collègues ont montré que les mésanges bleues du cru sélectionnaient précisément certaines plantes aromatiques (dont la lavande et la calaminthe) dont elles insèrent à répétition des fragments dans le nid en période de couvée. Il s'agit d'un comportement « pharmacologique » préventif : les végétaux choisis contribuent à la désinfection du nid, ce qui favorise le bon développement des oisillons. Ici encore, il a été démontré que l'olfaction intervient de façon décisive lors de la détection par la mésange des végétaux aromatiques appropriés.

RETROUVER SON GÎTE

C'est encore l'étude du pétrel qui a conduit, durant les années 2000, à des trouvailles surprenantes relatives à l'olfaction et à la cognition aviennes. L'on sait que sous beaucoup de latitudes, les pétrels vivent dans des terriers. Francesco Bonadonna, au Cefe, et ses collègues ont ainsi démontré que si le pétrel bleu des Kerguelen, qui ne rejoint sa tanière que la nuit venue, arrive à s'orienter dans la bonne direction, c'est par le truchement de l'odorat. En effet, si l'on obstrue les narines tubulaires de

En Corse, les mésanges bleues (*Cyanistes caeruleus*) disposent des plantes aromatiques dans leur nid en période de couvée... plantes qu'elles repèrent à leur odeur.



En Alaska,
les mouettes tridactyles
(*Rissa tridactyla*) choisissent
leur partenaire à l'odeur.

l'oiseau avec des bouchons, ou si on anesthésie sa muqueuse olfactive, il se retrouve désorienté et n'arrive pas à regagner son gîte. Chez des espèces apparentées, le puffin cendré atlantique et le puffin de Scopoli, Francesco Bonadonna, Anna Gagliardo, de l'université de Pise, ou encore Oliver Padget, à l'université d'Oxford, et leurs collègues ont mis en évidence un phénomène encore plus étonnant : grands migrants, ces puffins sont à même de retrouver leur nid à des centaines de kilomètres de distance, mais, rendus temporairement anosmiques, ils perdent cette capacité et tendent à s'égarer.

Ainsi, chez certaines espèces aviennes, les stimuli olfactifs contribuent à l'élaboration de cartes cognitives sophistiquées – localisées dans l'hippocampe – rendant possibles des comportements complexes d'orientation.

LA CARTE OLFACTIVE DU PIGEON VOYAGEUR

Mais les résultats les plus inattendus concernent sans doute le rôle possible du sens olfactif dans l'orientation du pigeon voyageur. L'on sait depuis longtemps que les repères visuels, la position du soleil ou les étoiles constituent des indices importants qui contribuent à ce que le pigeon retrouve à coup sûr le chemin du pigeonier. Cela dit, à eux seuls, ils sont encore insuffisants pour expliquer l'assimilation par l'oiseau de trajets souvent très complexes. La découverte, à partir des années 1980, de cristaux de magnétite, présents dans la partie supérieure du bec et dans l'oreille interne, puis celle, ultérieure, du caractère « magnétosensible » du cryptochrome, un pigment rétinien, ont permis d'appréhender que la détection du champ magnétique terrestre intervenait dans ce processus. Et surtout, des travaux italiens et allemands ont clairement fait ressortir l'importance de l'olfaction dans l'aptitude du pigeon à s'orienter. Celui-ci est capable de reconnaître

spécifiquement le bouquet olfactif propre à son gîte, et sans doute de constituer, grâce à certaines régions corticales spécialisées et l'hippocampe, une « carte olfactive » de son voyage : cette dernière serait alimentée en informations par des stimuli olfactifs tout comme les « cartes mentales » plus classiques le sont par des stimuli visuels chez les oiseaux et les mammifères... si bien qu'au-delà de 50 kilomètres de distance du pigeonier, des individus dont on a sectionné les nerfs olfactifs semblent dans l'incapacité de revenir à leur point de départ. De plus, dans le processus d'orientation, la modalité olfactive paraît latéralisée de façon significative : la majorité des individus retrouve moins aisément le bon chemin si l'on obture leur narine droite – ce qui implique un traitement des odeurs par l'hémisphère cérébral gauche.

Ainsi, avec l'étude de l'olfaction s'est ouvert un champ de recherche ornithologique entièrement nouveau, longtemps demeuré *terra incognita*. La génétique moléculaire est encore venue conforter les résultats issus d'approches plus classiques, mettant en lumière la proportion importante des gènes codant les récepteurs olfactifs fonctionnels chez les oiseaux, nettement supérieure à celle relevée dans l'espèce humaine. Il en va de même pour l'imagerie cérébrale.

Cependant, l'histoire de la controverse montre que bien avant l'émergence des techniques sophistiquées actuelles, des méthodes efficaces permettant la démonstration de l'olfaction avienne étaient à la disposition des investigateurs. Mais dans l'esprit des chercheurs aussi, les préjugés peuvent avoir la vie dure ! Remontant, semble-t-il, à la fin du XVIII^e siècle, l'idée selon laquelle la vision et l'audition performantes de beaucoup d'oiseaux s'étaient développées au prix de l'atrophie de l'odorat a persisté durablement. Qui plus est, jusque dans les années 1980, le cerveau avien était tenu sur le plan de l'évolution comme « archaïque » et « viscéral », gérant surtout des pulsions primaires et des automatismes comportementaux. Voilà qui ne prédisposait guère à mettre en lumière le rôle de la perception olfactive dans des processus cognitifs complexes chez l'oiseau ! En réalité, l'on sait aujourd'hui que bien que structurellement différent, le cortex avien comporte des régions qui équivalent au néocortex des mammifères. L'exploration du riche univers perceptif et cognitif des oiseaux ne fait donc que commencer. ■

BIBLIOGRAPHIE

B. Grison, **Les Portes de la perception animale**, Delachaux & Niestlé, à paraître en octobre 2020.

O. Padget et al., **Anosmia impairs homing orientation but not foraging behaviour in free-ranging shearwaters**, *Scientific Reports*, vol. 7, article 9668, 2017.

S. Leclaire et al., **Preen secretions encode information on MHC similarity in certain sex-dyads in a monogamous seabird**, *Scientific Reports*, vol. 4, article 6920, 2014.

T. Birkhead, **L'Oiseau et ses sens**, Buchet/Chastel, 2014.

N. Marples et T. Roper, **Effects of novel colour and smell on the response of naive chicks towards food and water**, *Animal Behaviour*, vol. 51(6), pp. 1417-1424, 1996.

J.-J. Audubon, **Scènes de la nature dans les États-Unis et le nord de l'Amérique**, vol. 1, Sauton, 1868.

R

ENDEZ-VOUS

P.82 Logique & calcul
 P.88 Idées de physique
 P.92 Chroniques de l'évolution
 P.96 Science & gastronomie
 P.98 À picorer

À LA RECHERCHE DES NOMBRES TRANSCENDANTS

Les nombres irrationnels, qu'ils soient algébriques ou transcendants, se laissent approcher plus ou moins difficilement par des suites de nombres rationnels. La mesure de cette difficulté permet de les classer.

L'AUTEUR



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

Les mots en mathématiques sont parfois arbitraires et difficiles à justifier: par exemple, pourquoi parle-t-on d'un «corps» de nombres en français alors qu'en anglais on emploie le mot *field* qui veut dire «champ»? Sans doute parce qu'il n'y a aucune raison précise de parler de corps ou de champ! Le sarcastique Bertrand Russell disait que «les mathématiques sont une science où l'on ne sait pas de quoi on parle, ni si ce qu'on dit est vrai» et, pour David Hilbert, si l'on raisonne correctement en géométrie, «on doit toujours pouvoir remplacer “points”, “droites”, “plans” par “tables”, “chaises”, “verres de bière”»...

Le nom «transcendance» et l'adjectif «transcendant», utilisés en théorie des nombres, font rêver et évoquent l'idée de choses profondes, à la limite de nos capacités de compréhension et de raisonnement. Proposés par Leibniz, ces mots sont d'un usage cette fois justifié, tant les problèmes posés par ces notions sont délicats et les progrès pour les maîtriser sont longs et seulement partiels. Voyons cela.

DES NOMBRES NON ALGÈBRIQUES

Nous nous limiterons aux nombres réels (2 , $-1/3$, $\sqrt{2}$, π , etc.), mais beaucoup des résultats que nous allons mentionner s'étendent aux nombres complexes comme le célèbre i dont le carré est -1 .

La plupart des ensembles de nombres réels s'emboîtent: il y a les entiers naturels $0, 1, 2, 3$, etc., contenus dans l'ensemble des entiers relatifs $0, 1, -1, 2, -2$, etc., eux-mêmes sous-ensemble de l'ensemble des nombres rationnels (les fractions) $0, 1, -1, 1/2, -1/2, 1/3, -1/3, 2/3, -2/3$, etc. Plus grand et contenant tous les

précédents, il y a les nombres algébriques, c'est-à-dire les solutions d'une équation polynomiale à coefficients entiers: $\sqrt{2}$ est un nombre algébrique car il est l'une des deux solutions de l'équation $X^2 - 2 = 0$. On dit que $\sqrt{2}$ est racine du polynôme $P(X) = X^2 - 2$.

Parmi les nombres algébriques, il y en a qu'on peut exprimer avec des radicaux (des racines carrées, des racines cubiques, etc.) mais il y en a, d'après le théorème d'Abel, qu'on ne peut pas exprimer avec des radicaux. C'est le cas, par exemple, de l'unique racine réelle du polynôme $X^5 - 3X - 1$.

Les nombres réels qui ne sont pas algébriques sont dénommés «nombres transcendants». L'idée derrière l'adjectif est simple: de tels nombres échappent à toute définition formulée en termes d'entiers et de polynômes, il doit donc être difficile d'en trouver et il est délicat de les comprendre!

IL EN EXISTE UNE INFINITÉ

La première question les concernant est bien évidemment: existe-t-il des nombres transcendants?

Une démonstration complète et n'exigeant aucun calcul (voir l'encadré 3) établit qu'il existe des nombres transcendants. Elle exploite le procédé diagonal découvert en 1891 par Georg Cantor, et permet de construire explicitement des nombres transcendants.

L'idée de la démonstration est simple. On prouve que l'infini des nombres algébriques est le même que celui des nombres entiers (infini qualifié de dénombrable). Sachant que l'infini des nombres réels est plus grand que celui des nombres entiers, on en déduit que la grande majorité des nombres réels sont transcendants et qu'il y en a une infinité.



Jean-Paul Delahaye a notamment publié: **Les Mathématiciens se plient au jeu**, une sélection de ses chroniques parues dans *Pour la Science* (Belin, 2017).