



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 Padgett, 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. Padgett 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).