

Pour la **HORS-SÉRIE** Science

La science expliquée par ceux qui la font

n° 119 – 05.23/06.23

L 13264 - 119 H - F: 9,90 € - RD



« Les ornithologues admirent
l'intelligence des oiseaux
depuis le début du XX^e siècle »

Vinciane Despret
Philosophe des sciences
et écrivaine

LES SUPERPOUVOIRS DES OISEAUX

Une structure
du cerveau
hors normes

Le secret
quantique
des migrations

Le véritable
sens de
leurs chants

Les manchots
empereurs,
rois des maths

Cerveau & Psycho

Partez à la découverte
de votre cerveau



Les clés de la
cognition et du
bien-être livrées
par les meilleurs
spécialistes

Un grand dossier
mensuel pour découvrir
un sujet en profondeur

Des conseils validés
par des psys et des
neuroscientifiques

Les dernières avancées
présentées par les
chercheurs eux-mêmes



cerveauetpsycho.fr

Retrouvez toutes nos offres d'abonnements ou rendez-vous sur boutique.groupepouirlascience.fr

Ouvrez les pages aux oiseaux!

par **Loïc Mangin**
Rédacteur en chef adjoint
à *Pour la Science*

Avoir une cervelle d'oiseau, donner des noms d'oiseau, un miroir aux alouettes, faire l'autruche, se faire plumer... les oiseaux n'ont pas bonne presse.

Pourtant la gent ailée a du génie! De fait, assure la philosophe des sciences Vinciane Despret dans *Habiter en oiseau*, « plus on étudie les oiseaux, plus les choses se compliquent ». Son livre invite à modifier notre façon d'envisager l'idée de territoire chez ces animaux et le rôle de leur chant pour le défendre. Mais d'autres sujets se sont prêtés à l'exercice du changement de regard. C'est le cas notamment de l'odorat, longtemps dénié aux volatiles, et surtout de l'intelligence. Au départ, une erreur d'anatomiste a empêché de leur attribuer des capacités cognitives élevées. Et puis, à force d'expériences et d'observations, les scientifiques ont dû se rendre à l'évidence, plusieurs espèces aviaires sont douées pour le raisonnement, la planification, l'imagination, la conception d'outils...

Ce numéro en forme de réhabilitation rend justice à leurs phénoménales capacités. Après sa lecture, « jamais plus », comme le corbeau du poème d'Edgar Poe, vous ne verrez une poule de la même façon. Alors, avec Pierre Perret, « ouvrez, ouvrez les pages aux oiseaux. Regardez-les s'envoler, c'est beau »!

Ont contribué à ce numéro



Steve Brusatte

Professeur de paléontologie et de la théorie de l'évolution à l'université d'Édimbourg, en Écosse, et consultant scientifique pour la BBC.



Vinciane Despret

Philosophe des sciences. Elle enseigne à l'université de Liège, en Belgique, et est l'auteurice d'*Habiter en oiseau* (Actes Sud, 2019).



Benoit Grison

Maître de conférences à l'UFR Sciences et techniques de l'université d'Orléans et membre du conseil scientifique de la revue *Espèces*.



Naomi Oreskes

Professeuse d'histoire des sciences à l'université Harvard, aux États-Unis, et membre de l'Académie des arts et des sciences américaine.

Les superpouvoirs des oiseaux

01

Un envol de grande classe

p. 6 Grand témoin

Vinciane Despret

4

“ Les oiseaux
ont eu le tort
de ne pas être
des primates

p. 14 Comment ils ont
pris la plume

Steve Brusatte

Si le plumage est apparu, ce n'est
certainement pas pour voler.

p. 24 Chérie, j'ai rétréci
les dinosaures!

Emily Singer

Pour décoller, les ancêtres
des oiseaux ont dû rapetisser.

p. 30 La tête de linotte,
un paradoxe évolutif

Kate Wong

La diversité des oiseaux masque
une grande stabilité évolutive.

p. 36 On achève bien
les oiseaux

Naomi Oreskes

Sur une planète modelée par
les humains, ils souffrent.

02

Les maîtres du ciel

- p. 42** L'as des as
Yasemin Saplakoglu
Aucun avion ne manœuvre aussi bien, et on sait pourquoi.
- p. 50** Le moteur invisible des migrateurs
Jordana Cepelewicz
Optimiser l'énergie: leur secret serait thermodynamique.
- p. 58** Des navigateurs à boussole quantique
Peter Hore
et **Henrick Mouritsen**
Les migrateurs ont le compas dans l'œil... littéralement!
- p. 66** Drôles d'oiseaux
Olivier Voizeux
Tout en photos, la galerie des plus épatants.



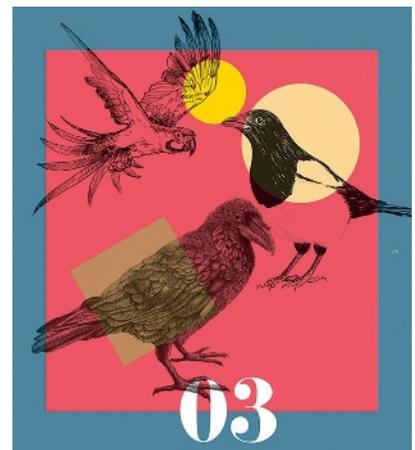
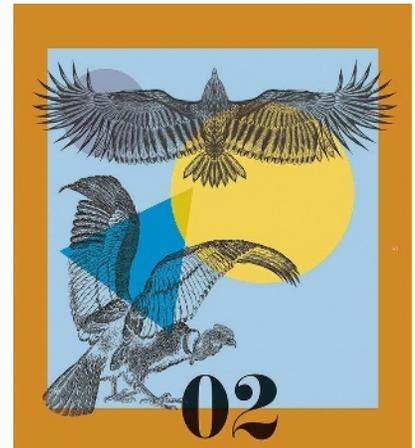
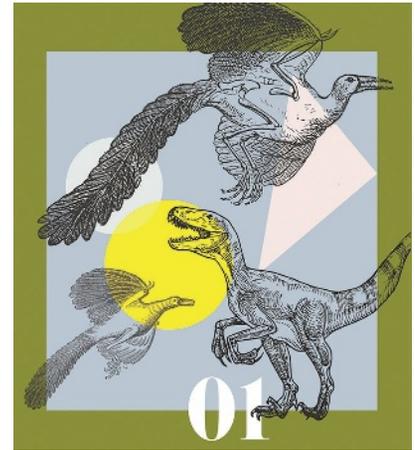
03

Petits cerveaux, grands esprits

- p. 76** Pas manchots en maths
Susan D'Agostino
Les empereurs se réchauffent avec une rigueur mathématique.
- p. 82** Dans la tête d'un piaf
Onur Güntürkün
L'intelligence, un privilège de gros cerveau? Eh non!
- p. 90** Le sens caché du chant
Adam Fishbein
Et si nos oreilles humaines passaient à côté de l'essentiel?
- p. 100** L'épineuse question du flair des oiseaux
Benoit Grison
Osons le dire, et même l'écrire: les piafs ont du pif.

p. 107 Rendez-vous

- 108 En image
- 110 Rebondissements
- 116 Infographie
- 118 Incontournables



En couverture: ©Krasula/Shutterstock

« Les oiseaux ont eu le tort de ne pas être des primates »

6

Vinciane Despret
est philosophe des sciences.
Elle enseigne à l'université
de Liège, en Belgique,
et est l'auteurice de l'essai
Habiter en oiseau
(Actes Sud, 2019).



Faire l'autruche ou le perroquet, être une bécasse, bavard comme une pie... Comparer un humain à un oiseau est souvent dépréciatif. Est-ce que cela dit quelque chose de notre rapport à ces animaux ?

On trouverait aussi des exemples inverses comme «chanter comme un rossignol» ou être «libre comme un oiseau» (*free as a bird*) en anglais. Selon moi, on doit y voir quelque chose de plus général sur l'usage des noms d'animaux dans le cadre de l'insulte. Chien, cochon, rat... entrent dans ce même champ sémantique – les chats y échappent un peu, alors qu'ils ont aussi été détestés. Au-delà des seuls oiseaux, l'ensemble des animaux est convoqué, dans une tradition exceptionnaliste, pour que l'humain puisse marquer sa différence et se considérer comme un être à part. La comparaison devient une «arme de guerre» pour – coup double! – disqualifier à la fois les animaux et la personne désignée. Ni l'autruche ni la bécasse n'échappent à cet enrôlement.

Les oiseaux n'ont-ils pas été regardés de haut par la science ?

Il me semble qu'ils ont eu le tort de ne pas être des primates, et plus largement des mammifères. Avant qu'ils ne les fassent accéder au panthéon des élus cognitifs (et cela grâce aux corvidés, il faut le rappeler), nos scientifiques avaient une nette préférence pour les êtres de la même filiation qu'eux. Ils se sont donc d'abord tournés vers

les mammifères du fait de cette proximité, sachant que nous nous sommes toujours considérés comme les créatures les plus intelligentes. On a ainsi commencé à évaluer l'intelligence des chimpanzés parce qu'ils étaient nos plus proches cousins et celle des babouins, parce que leur étude était facile du point de vue pratique.

Parvenir jusqu'aux oiseaux exigeait un décentrement assez fort. Par ailleurs, je fais l'hypothèse que les éthologues académiques étaient un peu en rivalité avec les naturalistes amateurs du point de vue du savoir. En effet, les oiseaux étaient bien connus des amateurs parce qu'on les rencontre facilement lorsqu'on se promène en forêt ou quand on en chasse. Konrad Lorenz a d'ailleurs fondé l'éthologie en excluant les amateurs, au motif qu'ils se nourrissaient d'anecdotes et pratiquaient l'anthropomorphisme, mais aussi... en les pillant! Il est donc possible que tout ce savoir non professionnel ait fait l'objet d'une disqualification pendant très longtemps avant d'être de nouveau écouté.

Quant au regard «de haut»... On croise au début du xx^e siècle des ornithologues très admiratifs de l'intelligence sociale de ces animaux et de leur comportement. Mais il est vrai que les recherches cognitives sont venues beaucoup plus tardivement. Les comportementalistes ont tenté d'étudier les corvidés en laboratoire dans les années 1950, sans aucun succès. Et il faut attendre encore vingt ans qu'on ne teste leur aptitude à utiliser des outils, coopérer, ouvrir des boîtes. Pourtant, dès le vii^e ou le vi^e siècle avant notre ère, Ésope mettait en scène, dans une fable, un corbeau capable de faire monter le niveau de l'eau dans une

“ Je me suis demandé si le chant n’était pas, pour l’oiseau, une façon littérale d’étendre son corps dans l’espace

cruche en y ajoutant des pierres. Ce savoir a mis plus de deux mille ans à nous revenir...

Longtemps l’amateur d’oiseaux a voulu posséder l’oiseau, le disséquer, collectionner son plumage. Et puis il s’est contenté de l’écouter. Qu’est-ce qui s’est passé ?

Je ne suis pas historienne, mais à écouter les ornithologues on comprend qu’un homme a changé les choses : c’est le Britannique Henry Eliot Howard. Dans son livre *Territory in Bird Life*, paru en 1920, non seulement il offre les descriptions les plus minutieuses, mais il propose une théorie cohérente pour rendre compte de ses observations : les oiseaux s’assurent un territoire afin qu’en toute sécurité ils puissent s’accoupler, construire le nid, protéger les petits et trouver de la nourriture en suffisance pour nourrir la nichée. Howard était un naturaliste passionné, il consacrait les premières heures de chacune de ses journées à l’observation des oiseaux, avant de se rendre dans l’usine sidérurgique qu’il dirigeait. Et en effet, au lieu de collecter des spécimens morts, il a été pionnier en s’intéressant aux vies d’oiseaux.

C’est donc un amateur qui a changé le regard des professionnels.

Il n’est pas le seul. L’Américaine Margaret Morse Nice, par exemple, observait des bruants chanteurs autour de sa maison dans l’Ohio,

dans les années 1920. En baguant les oiseaux avec des fils de couleur, elle a constaté que les mâles retournaient chaque année sur le même territoire, que certains partaient en migration – elle les appellera les « résidents d’été » –, quand d’autres, les « résidents d’hiver », font le choix de rester toute l’année. À son époque, elle est la seule à observer cela. Si elle a pu le faire, c’est parce que la notion de territoire peut être étudiée par des amateurs, car il s’agit de sciences... à la maison ! On peut observer les oiseaux dans son jardin, ou dans la prairie voisine, de façon suffisamment rigoureuse et systématique pour atteindre les critères d’exigence d’un savoir scientifique.

Pour votre livre *Habiter en oiseau* vous avez enquêté sur la notion de territoire. Quel est l’intérêt pour un oiseau ?

À la suite de Howard, il est devenu évident que, pour les oiseaux dits « territoriaux » (ils ne le sont pas tous), disposer de son propre domaine, de manière exclusive, minimise les déplacements, par exemple pour se nourrir, et évite d’abandonner une nichée bruyante susceptible d’attirer les prédateurs. Il y a une logique là-dedans, et pour certains oiseaux, avoir un « lieu défendu » est important. Avec un regard très machiste, et même patriarcal, qui était alors celui des sciences naturelles, on a aussi soutenu que le territoire

simplement protéger? S'il est vrai que les oiseaux qui défendent un territoire ne le font pas contre les individus d'autres espèces qui n'ont pas les mêmes besoins, on remarque que, dans de nombreux cas, les intrus de la même espèce sont tolérés tant qu'ils se nourrissent, mais qu'ils sont chassés s'ils se mettent à parader ou à chanter – c'est notamment le cas des accenteurs mouchets. En outre, je crois impossible de comprendre ce qu'est un territoire pour beaucoup d'oiseaux si l'on néglige le rôle de la périphérie comme lieu de rencontres et d'échanges: il est évident que nombre d'entre eux sont très intéressés par ces *clashes* aux limites de leur territoire.

Chanter sert-il à prévenir les congénères de rester loin ?

Ce n'est pas mon sentiment. La fonction d'avertissement n'est qu'une des façons possibles de comprendre le chant. Il est peut-être là aussi pour dire aux autres: écoutez comme je chante bien. Ou bien: est-ce qu'on ne chanterait pas un petit coup ensemble? Car il y a un vrai désir de chanter chez les oiseaux. On a constaté que certains chantent mieux, à l'automne, quand il n'y a plus aucun enjeu territorial, comme s'ils chantaient pour chanter. L'ornithologue Richard Prum, qui enseigne à l'université Yale, soutient que la beauté existe simplement... parce que c'est beau. Il entend par là que la pression sélective, exercée notamment par les femelles, va jouer en faveur de la beauté, pour elle-même, que ce soit la beauté des plumes ou celle des chants – en

englobait la «ressource femelle». Passons sur l'emploi du mot «ressource», récupéré par le néolibéralisme, qui exprime des rapports quasi commerciaux avec le milieu et avec les autres...

Pourtant, en inversant le raisonnement, on constate que les femelles ont accès à une double ressource, c'est-à-dire un mâle et un territoire dont il s'occupe! Mais définir ainsi le territoire est une routine de pensée qui néglige la dimension profondément sociale des oiseaux. Au-delà de la nourriture ou de la reproduction, il est très important pour eux de continuer à rester en contact avec les autres. À la fin de mon enquête, je découvre que, dès la fin des années 1960, des ornithologues concluent cette chose magnifique que les territoires sont des hauts lieux de socialité. L'isolement apparent n'est qu'une partie du phénomène, en réalité les territoires sont toujours adjacents les uns aux autres, il n'existe aucun territoire au milieu de nulle part. On reste ensemble, mais en ayant une aire de tranquillité pour les besoins de la reproduction.

En conséquence, comment formuler « en oiseau » la notion de territoire ?

C'est un peu difficile de répondre, le territoire est une notion très générale, grâce à laquelle chaque chercheur sait ce qu'il doit étudier. Mais une fois la définition posée, on voit qu'il y a de multiples façons de «faire territoire». La définition minimaliste est: n'importe quel lieu défendu. Une fois cela dit, que veut dire «défendre»? Comment défend-on? Cela signifie-t-il empêcher toute forme d'intrusion ou bien

À LA DIFFÉRENCE D'UN MAMMIFÈRE,
UN OISEAU NE LAISSE PAS VRAIMENT
DE TRACES CORPORELLES, ODORANTES
ET VISIBLES. LES SIENNES SONT
TRÈS FUGACES

Les ornithologues sont des poètes. Ils sont confrontés à des questions de beauté dont ils ne peuvent pas négliger la portée qu'elle a sur leur propre manière de savoir

10

sachant, bien entendu, que d'autres scientifiques préfèrent plaider en faveur du fait que la beauté «n'est pas vraiment pour elle-même», mais serait indicatrice de la santé ou de la vigueur du mâle. Cependant, l'une des hypothèses les plus intéressantes de la biologie évolutive propose que les plumes ont évolué notamment parce qu'elles offraient de beaux costumes, avant d'être mises au service du vol. Le chant, comme les plumes, a vécu de multiples aventures au cours de l'évolution en étant utilisé pour plaire à une femelle, revendiquer, dire je suis chez moi, interpeller, faire chorale avec les autres, dire: «Écoutez comme on s'entend bien»... Le chanteur peut avoir quantité de raisons de chanter et de trouver de l'intérêt, voire du plaisir à le faire.

Les oiseaux se déplacent plus facilement que les mammifères. Est-ce que cela change leur rapport à l'espace ?

Forcément. Selon qu'on est merle ou sanglier, le territoire n'a pas le même sens. Certes, dans les deux cas, il y a usage de marques et de «pancartes». Mais chez les oiseaux, elles sont éphémères, plutôt vocales (et aussi visuelles avec les plumes, les arrangements chorégraphiques), alors que les mammifères déposent une partie de leur corps quelque part afin d'être présents

partout. Il y a un choix de la pérennité. Quand l'écrivain Jean-Christophe Bailly écrit que le territoire est où on peut se cacher et où on sait se cacher, il parle plutôt des mammifères. C'est alors un lieu de sécurité. Chez les oiseaux, ce serait plutôt un lieu d'exhibition. La différence est marquante. L'oiseau dit «je suis là» de façon beaucoup plus théâtralisée.

Vous envisagez même que le chant soit une projection du corps de l'oiseau. Que voulez-vous dire ?

Cette hypothèse, je la formule en marchant sur des œufs, si je puis dire. Comme je l'ai indiqué, un oiseau ne laisse pas vraiment de traces corporelles, odorantes et visibles. Les siennes sont très fugaces, et je me suis demandé si le chant n'était pas en quelque sorte, pour lui, une façon littérale d'étendre son corps dans l'espace. Nous, humains, le sentons quand nous parlons, il est possible que notre voix couvre l'espace, occupe toute la place. Je ne parle pas de langage articulé, mais de ce qui est animal dans la voix humaine. Après tout, écouter de la musique à tout casser dans notre voiture nous offre peut-être une expérience proche, nous saturons l'espace avec nos sons, au point (je l'ai remarqué) qu'on finit par voir moins bien.



L'intelligence, dit-on, est ce que mesurent les tests. Que diraient les oiseaux s'ils mesuraient nos capacités, par exemple, à nous repérer dans l'espace, sans outils, lors d'une migration de 13 000 kilomètres ?

... ou à sentir un courant d'air chaud ascendant, ou à ne pas se «viander» en atterrissant ! La philosophe australienne Val Plumwood demandait qu'à la place d'intelligence on parle plutôt de sagesse, et je trouve que c'est très joli. Vous avez raison de commencer votre question avec la citation attribuée à Alfred Binet. L'intelligence est une fabrique humaine, à destination pratique, très hiérarchisée; quand vous faites passer des tests à des enfants, ce que j'ai fait par le passé, vous comprenez à quel point vous adhérez à des ordres culturels, à quel point ce que ces tests peuvent mesurer est la conformité à des normes culturelles ou sociales. Parler d'intelligence, c'est tout de suite mettre les animaux, et les oiseaux en particulier, dans une catégorie où ils seront forcément perdants par rapport à nous.

Être intelligent serait alors être «comme» l'humain, mais en moins bien. C'est pour cette raison que j'aime la proposition de Val Plumwood. La sagesse d'un oiseau, ou sa «puissance» pour reprendre le mot du philosophe Gilles Deleuze,

c'est davantage sa capacité à jouer avec l'air, à retrouver des graines, à se repérer sur de longs trajets, à anticiper. Ces deux catégories sont préférables à celle d'intelligence, prétendument unifiante, mais qui tout de suite hiérarchise tous ceux qu'elle inscrit dans une catégorie définie *a priori* selon des critères humains.

Vous avez côtoyé des ornithologues pour votre enquête. Qu'est-ce que ces scientifiques ont de singulier ?

Ce sont des poètes. La raison est assez simple à formuler: ils sont confrontés à des questions de beauté dont ils ne peuvent pas négliger la portée qu'elle a sur leur propre manière de savoir. Je pense notamment au Français Thierry Aubin, spécialiste de l'alouette des champs, qui ne parvenait pas à saisir ce qui, dans le chant de cet oiseau, portait l'information. Et puis, un jour, il a modifié les silences. Et il a conclu: il nous a fallu dix ans pour comprendre que ce qui importe dans le chant de l'alouette est le silence. Si ça, ce n'est pas de la poésie...

Propos recueillis par Olivier Voizeux

Un envol de grande classe

C'est la plume qui fait l'oiseau. Davantage encore que la capacité de voler, ces appendices de kératine, matière constitutive des poils, des griffes et des sabots, sont les marqueurs forts de ce groupe aux 10 000 espèces connues. Certes, la plume est d'abord apparue chez les dinosaures bipèdes, et sans doute certains de leurs descendants en porteraient-ils encore si leur extinction n'avait été aussi large. Seuls ces authentiques dinosaures que sont les oiseaux ont survécu, sans doute parce que leur mobilité, leur régime alimentaire et leur petite taille, acquise à rebours de leurs congénères XXL, ont été de fieffés avantages. Soixante-six millions d'années plus tard, ce qu'une météorite de 10 kilomètres n'a pas su faire, l'espèce humaine est hélas en train de le réussir.



Cet appendice indispensable pour prendre l'air est apparu chez les dinosaures... sans aucun rapport avec le besoin de voler!

Comment ils ont pris la plume

Steve Brusatte

Dans les reconstitutions de dinosaures
théropodes, le plumage a désormais
supplanté les écailles.



Pékin, six heures du matin. Par une froide journée de novembre, je me fraye un chemin dans la gare vers un train bondé, direction Jinzhou, ville aux trois millions d'habitants du nord-est de la Chine. À bord, impossible de trouver le sommeil, tant je pense au but de ce voyage: un extraordinaire fossile découvert par hasard par un paysan. D'après les bruits qui courent, il est incroyable.

Quatre heures plus tard, gare de Jinzhou. Je suis avec Junchang Lü, un célèbre chasseur de dinosaures de l'Académie chinoise des sciences géologiques, qui a sollicité mon aide. Avec un petit groupe de dignitaires, nous rejoignons ensuite le muséum de la cité. Là, au bout d'un long couloir, dans une pièce, une plaque rocheuse repose sur une petite table. C'est l'un des plus beaux fossiles que j'aie jamais vus: un squelette à peu près grand comme un âne, et d'une couleur chocolat qui contraste avec le calcaire gris dans lequel il est enchâssé (*voir la photo page 17*).

L'animal, manifestement un dinosaure, a des dents ressemblant à des couteaux à viande, des griffes acérées et une longue queue. Aucun doute, il s'agit d'un proche cousin de *Velociraptor*, ce prédateur popularisé par le film *Jurassic Park*. Cependant, le spécimen chinois diffère notablement de cette star de cinéma. Ses os sont légers et creux; ses pattes sont longues et étroites comme celles d'un héron. Son corps devait être recouvert de divers types de plumes, notamment sur les bras, où des pennes de grande taille s'emparaient et formaient des ailes. Ce dinosaure ressemblait étonnamment à un oiseau!

En bref

> Depuis la découverte de dinosaures à plumes en Chine, il est établi que les oiseaux sont issus des dinosaures théropodes.

> Les nombreux fossiles de ces animaux révèlent que les plumes sont apparues d'abord sous forme de duvets colorés, utiles pour préserver la chaleur du corps et s'attirer l'intérêt des femelles.

> La capacité de voler n'est venue qu'après, au terme d'une lente et profonde modification de la morphologie des dinosaures aviens.

Junchang Lü et moi avons nommé cette nouvelle espèce *Zhenyuanlong*. Il s'agit d'un des nombreux dinosaures à plumes découverts au cours des vingt dernières années dans la province chinoise du Liaoning. Or le remarquable registre fossile constitué par toutes ces découvertes illustre la façon dont certains dinosaures ont évolué et donné naissance aux oiseaux.

Les implications de ces fossiles sont capitales, car, depuis Darwin, les paléontologues s'interrogent sur la façon dont l'évolution fait apparaître des classes entières de nouveaux animaux. Le phénomène se produit-il rapidement, à la faveur de quelque bizarre innovation de rupture? Ou peu à peu sur plusieurs millions d'années, à mesure que les formes de vie s'adaptent à de nouvelles conditions environnementales? *Zhenyuanlong* et les fossiles du Liaoning nous éclairent sur le cas des oiseaux.

L'ÉTONNANT SQUELETTE D'UN TRÈS VIEUX PIAF

De très nombreux traits séparent aujourd'hui les oiseaux des autres animaux. La capacité de voler, bien sûr, mais aussi un métabolisme élevé, qui favorise une croissance spectaculairement rapide; un cerveau relativement gros qui les dote d'une bonne intelligence et de sens développés. En réalité, les oiseaux sont tellement particuliers que les paléontologues se sont longtemps interrogés sur leur origine.

C'est le biologiste anglais Thomas Henry Huxley, ami de Darwin et l'un de ses plus fervents

soutiens, qui a proposé une réponse. En 1861, deux ans après la publication de *L'Origine des espèces*, des carriers bavarois ont découvert qu'une plaque de calcaire fendue contenait un curieux squelette. Doté de griffes acérées et d'une longue queue reptilienne, l'animal avait aussi des bras emplumés. Des ailes? Huxley remarqua que la forme en question, que l'on nomma *Archaeopteryx*, soit l'«oiseau archaïque», ressemblait beaucoup à de petits dinosaures carnivores comme *Compsognathus*, qui commençaient aussi à être mis au jour. Il avança donc l'idée, radicale en son temps, que les oiseaux descendaient des dinosaures. Les autres biologistes n'étaient pas d'accord. Le débat a duré plus d'une centaine d'années.

La question fut finalement tranchée par la découverte de nouveaux fossiles. Au milieu des années 1960, dans l'ouest de l'Amérique du Nord, John Ostrom mit au jour *Deinonychus*, un dinosaure de forme étonnamment proche de celle d'un oiseau. Ses longs bras ressemblent beaucoup à des ailes; sa structure, qui suggère l'agilité, est révélatrice d'un animal actif et énergique. Le paléontologue avança que *Deinonychus* avait peut-être des plumes. Après tout, si les oiseaux sont issus des dinosaures – ce qu'entretemps de nombreux paléontologues commençaient à accepter –, les plumes devaient être apparues quelque part sur cette trajectoire évolutive. Mais impossible de trancher avec les seuls os de l'animal. Par malchance, les chairs et les parties

Zhenyuanlong est un dinosaure à plumes découvert à Jinzhou, en Chine. C'est l'un des nombreux fossiles découverts récemment qui montrent que les dinosaures théropodes ont longuement évolué avant même l'apparition de la capacité à voler.

molles, notamment les plumes, ne résistent que très rarement à la fossilisation.

John Ostrom prit son mal en patience et continua à chercher le graal paléontologique qui prouverait sans le moindre doute le lien entre les dinosaures et les oiseaux: un squelette de dinosaure ayant conservé des traces de plumage. En 1996, alors que sa carrière tirait à sa fin et qu'il participait au congrès annuel de la Société de paléontologie des vertébrés à New York, Philip Currie l'aborda. Ce paléontologue, aujourd'hui à l'université de l'Alberta, s'intéressait aussi aux dinosaures aviformes. Il revenait de Chine, où il avait eu vent d'un fossile extraordinaire, dont il rapportait une photographie. On y voyait un petit animal entouré d'un halo duveteux, admirablement bien conservé par l'épaisse couche de cendres volcaniques qui l'avait enseveli aussi brusquement que le Vésuve avait fait disparaître Pompéi. John Ostrom en pleura d'émotion: quelqu'un avait enfin trouvé son dinosaure à plumes!

RUÉE VERS L'OS

Nommé ensuite *Sinosauropteryx*, le fossile de Philip Currie inaugurerait une spectaculaire série de découvertes. Tels des prospecteurs avides d'or, les paléontologues se ruèrent en masse dans le Liaoning et constatèrent que seuls les paysans locaux savaient où chercher. Presque trois décennies après la découverte de *Sinosauropteryx*, plus de vingt espèces de dinosaures à plumes ont été mises au jour dans cette région de Chine. Ils vont

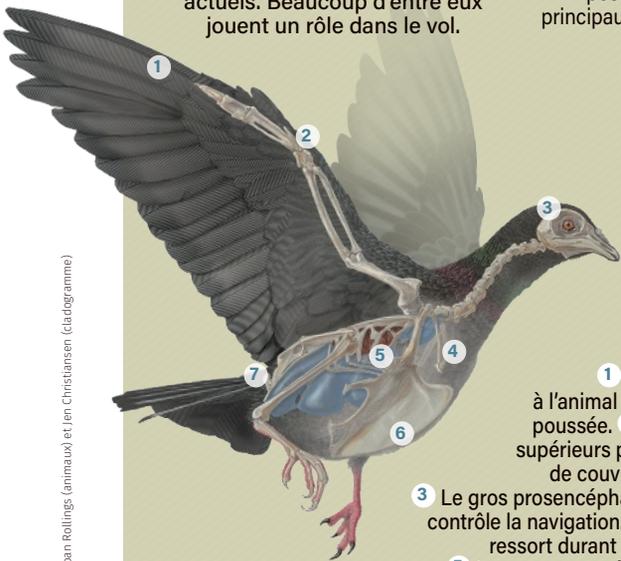


Une transformation pas à pas

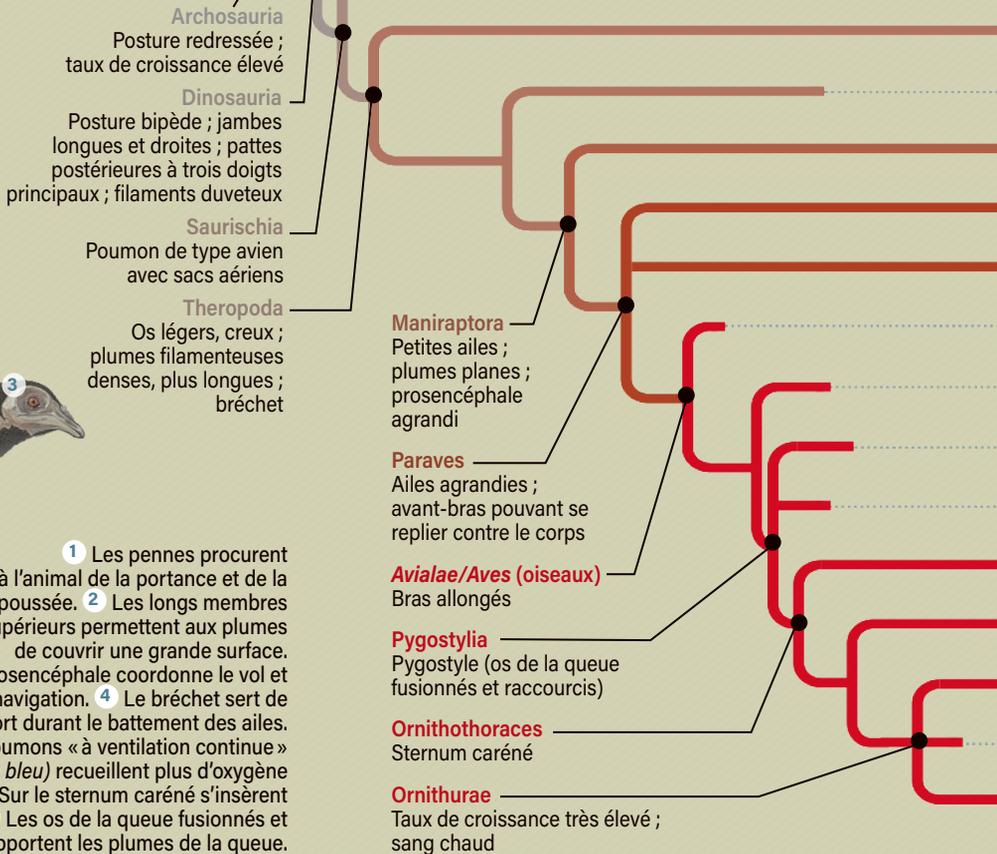
Les biologistes s'interrogent depuis longtemps sur la façon dont l'évolution produit des groupes d'organismes entièrement nouveaux. Le registre fossile montre que dans le cas des oiseaux et de leurs ancêtres dinosaures, ce processus s'est déroulé lentement. Les traits caractérisant les oiseaux ne se sont accumulés que très progressivement et, dans la plupart des cas, dans le cadre d'adaptations sans rapport avec les fonctions que ces traits remplissent aujourd'hui.

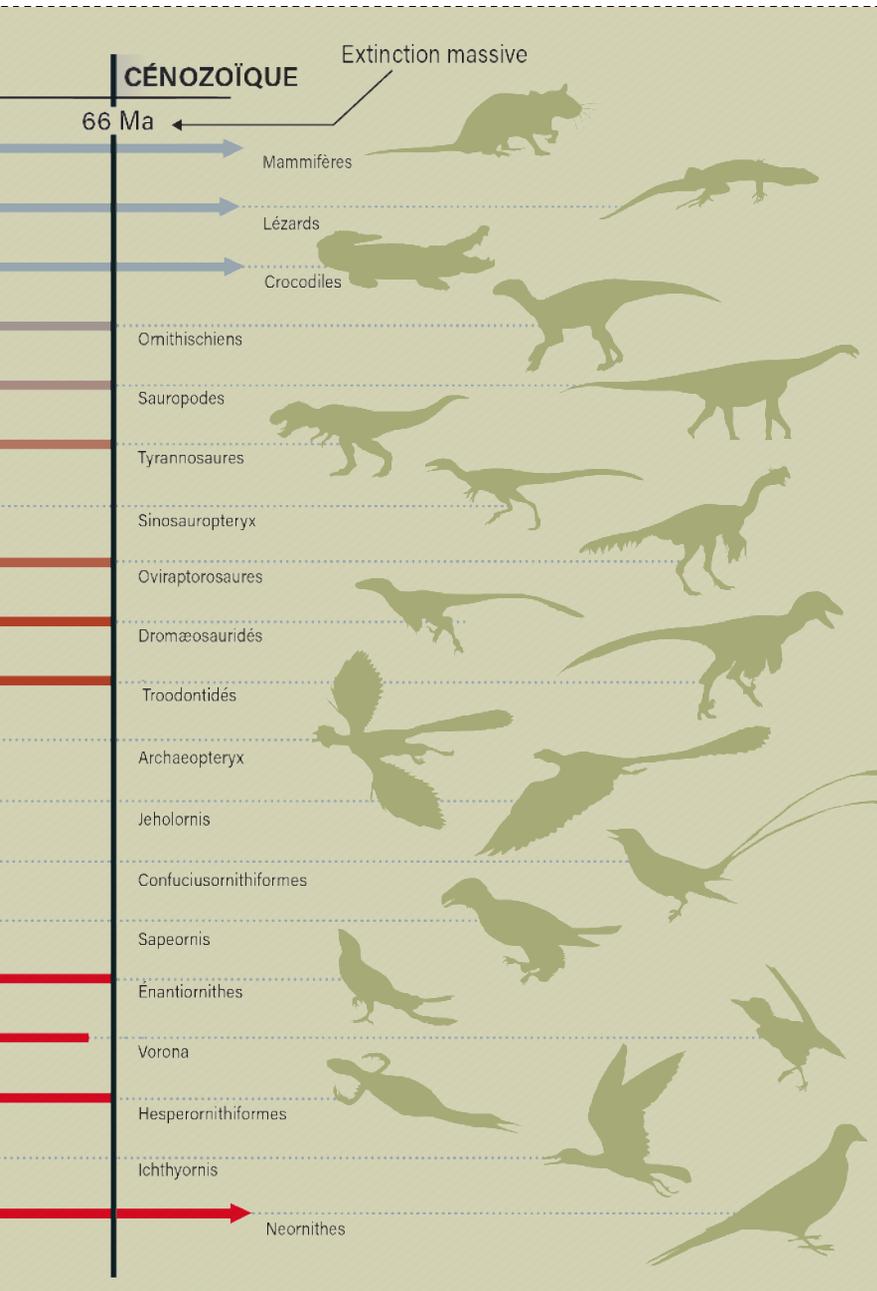
Une anatomie distinctive

Les oiseaux présentent une multitude de traits qui les distinguent des autres animaux actuels. Beaucoup d'entre eux jouent un rôle dans le vol.



- 1 Les plumes procurent à l'animal de la portance et de la poussée.
- 2 Les longs membres supérieurs permettent aux plumes de couvrir une grande surface.
- 3 Le gros prosencéphale coordonne le vol et contrôle la navigation.
- 4 Le bréchet sert de ressort durant le battement des ailes.
- 5 Les poumons « à ventilation continue » (en rouge) et les sacs aériens (en bleu) recueillent plus d'oxygène et allègent le squelette.
- 6 Sur le sternum caréné s'insèrent d'énormes muscles pectoraux.
- 7 Les os de la queue fusionnés et raccourcis supportent les plumes de la queue.





de cousins primitifs du *Tyrannosaurus rex*, longs de 9 mètres et couverts d'une sorte de pelage en duvet, à des herbivores de la taille d'un chien, hérissés de pointes comme un porc-épic, en passant par des planeurs de la taille d'un corbeau dotés de vraies ailes.

Les dinosaures à plumes du Liaoning le confirment : les oiseaux sont issus des dinosaures. Cette phrase est peut-être un peu trompeuse, car elle laisse penser que les dinosaures et les oiseaux sont deux groupes totalement distincts. En réalité, les oiseaux sont des dinosaures ; ils constituent l'un des nombreux groupes d'animaux qui descendent de l'ancêtre commun des dinosaures. En d'autres termes, ce sont des dinosauriens, au même titre que les bien connus *Triceratops* et *Brontosaurus*. Cela peut paraître étonnant, mais on peut se dire que les oiseaux sont des dinosaures aberrants exactement de la même façon que les chauves-souris sont des mammifères aberrants : ils sont capables de voler !

19

METTRE LES DINOS DANS DES ARBRES

Les fossiles du Liaoning éclairent la généalogie des oiseaux en indiquant à quel niveau leurs lignées apparaissent sur l'arbre phylogénétique des dinosaures. Les oiseaux constituent en effet un clade de dinosaures (un clade est un groupe de taxons – d'espèces – regroupant un ancêtre commun et tous ses descendants), qui fait partie du clade des théropodes. Le nom de ces dinosaures carnivores réunit deux racines grecques traduisant l'idée d'« animaux à pieds de bêtes sauvages ». *T. rex*, *Allosaurus* ou encore *Spinosaurus* sont des théropodes, mais du genre massif. Cependant, les théropodes proches des oiseaux constituent un clade d'animaux de petite taille particulièrement agiles et intelligents, nommé *Maniraptora*. Popularisé sous le terme de *raptors* dans le film *Jurassic Park*, ce clade comprend notamment *Velociraptor*, *Deinonychus* (révélé par John Ostrom) et *Zhenyuanlong*. C'est

RENDRE LE VOL POSSIBLE,
SÉDUIRE UNE FEMELLE OU
INTIMIDER UN RIVAL, RETENIR
LA CHALEUR CORPORELLE, PROTÉGER
LES ŒUFS PENDANT LA COUVAISON...
LES PLUMES ONT TANT D'USAGES QU'IL
A ÉTÉ DIFFICILE DE COMPRENDRE QUELLE
FUT LEUR PREMIÈRE FONCTION



donc quelque part au sein de cette foule de théropodes à plumes que se trouve la ligne de démarcation entre «oiseaux» et «non-oiseaux».

Nous disposons aujourd'hui de tellement de dinosaures à plumes que leur ensemble fournit le meilleur des aperçus sur l'une des plus remarquables transitions évolutives de l'histoire de la vie. Pour étudier ces fossiles, les chercheurs commencent par en tracer des images tridimensionnelles par tomographie à rayons X (ou scanner 3D). Ils se livrent ensuite à de savantes analyses informatiques afin de les placer dans des arbres de parenté. Des programmes de simulation aident aussi à reconstituer leur biomécanique. Et grâce à des techniques statistiques élaborées, nous retraçons l'apparition au cours de l'évolution de nouveaux traits ou de nouvelles espèces. C'est ainsi que nous sommes parvenus à établir par quelle trajectoire évolutive certains dinosaures se sont transformés en oiseaux.

AU CHAUD DANS SON DUVET

Au centre de l'énigme de l'apparition des oiseaux figure la question de l'origine de ces productions cornées de la peau que sont les plumes. Celles-ci sont aux oiseaux ce que les cheveux gominés et les rouflaquettes étaient à Elvis Presley: un signe distinctif incontournable! Au premier coup d'œil sur les longues rémiges d'un aigle ou sur la queue bariolée d'un paon, nous savons qu'il s'agit d'un oiseau. En effet, ce sont les seuls animaux dotés de plumes. Des attributs loin d'être anodins: ce sont des outils polyvalents

qui rendent le vol possible, aident à séduire une femelle ou à intimider un rival, retiennent la chaleur corporelle, isolent et protègent les œufs pendant la couvaie... Les plumes ont tellement d'usages qu'il a été difficile de comprendre quelle fut leur première fonction sélectionnée par l'évolution.

Grâce à *Sinosauropteryx* et aux autres fossiles, nous sommes en tout cas certains d'une chose: les plumes ne sont pas subitement apparues avec les premiers oiseaux, mais beaucoup plus tôt, chez leurs lointains ancêtres dinosauriens. Il est même possible que l'ancêtre commun de tous les dinosaures en ait eu lui-même. Toutefois, les toutes premières plumes différaient beaucoup des plumes qui nous sont familières grâce aux oiseaux modernes. Le plumage de *Sinosauropteryx* et de nombreux autres ressemblait plutôt à un duvet constitué de milliers de filaments comparables à des poils. Les dinosaures équipés d'un tel plumage ne volaient absolument pas, car leurs plumes ne s'y prêtaient pas et ils n'avaient même pas d'ailes. Ces premières plumes ont été sélectionnées parce qu'elles apportaient probablement un autre avantage adaptatif: l'isolation thermique.

Chez la plupart des dinosaures, un revêtement de téguments duveteux suffisait. Au sein du clade des théropodes maniraptoriens, un nouveau type de couverture corporelle s'est peu à peu développé: les filaments se sont d'abord allongés, puis se sont ramifiés – initialement en touffes, puis de façon de plus en plus ordonnée – de part et d'autre d'une tige centrale. Une fois les barbes

complétées de barbules selon un réseau plan et régulier, la plume, c'est-à-dire la «plume d'oie» que nous avons tous en tête, était née. Alignées et disposées en couches sur les bras, ces plumes plus complexes ont fini par former des ailes. De la taille d'un corbeau, le dinosaure *Microraptor* du Liaoning (voir sa reconstitution dessinée en haut de la page ci-contre) décrit en 2003 par Xu Xing, de l'Institut de paléontologie des vertébrés et de paléoanthropologie de Pékin, avait aussi, sur ses pattes et sa queue, des plumes structurées en véritables «ailes», un plan d'organisation inconnu chez tous les oiseaux modernes.

Pourquoi du duvet s'est-il transformé en plumes structurées? D'emblée, l'intuition nous souffle que c'est évidemment pour voler. Le corps des maniraptoriens était en train de se muer en avion, et leurs ailes ont évolué jusqu'à adopter un profil aérodynamique capable de créer la portance. Cependant, l'étude attentive du registre fossile suggère une autre trajectoire évolutive. Il semble que plusieurs petits animaux ailés, tel *Microraptor*, étaient capables de planer, comme l'indiquent les expériences en soufflerie et les simulations de Gareth Dyke, de l'université de Debrecen, en Hongrie. Mais d'autres, comme *Zhenyuanlong*, avaient un corps lourd doté de petits bras, et étaient incapables de décoller. En outre, aucun de ces dinosaures ailés n'était équipé des énormes muscles pectoraux nécessaires au vol. Et peu d'entre eux avaient les pennes asymétriques dotées d'un bord d'attaque (celui où le flux d'air aborde la plume) et d'un bord de fuite (le flux d'air y quitte la plume)

capables de résister aux intenses forces aérodynamiques engendrées par le vol.

Les recherches récentes suggèrent que les ailes avec leurs plumes ont d'abord été des attributs sexuels. Ainsi, Jakob Vinther, de l'université de Bristol, en Angleterre, a réussi à identifier au microscope les structures porteuses de pigments, les «mélanosomes», dans les fossiles. On a ainsi montré que le plumage des dinosaures non aviens (ne volant pas) présentait tout un spectre de couleurs. Certaines des plumes étaient même iridescentes, c'est-à-dire qu'elles changeaient de couleur selon l'angle d'observation, comme c'est le cas chez de nombreux oiseaux actuels. De tels habits de parade devaient être précieux pour séduire une partenaire potentielle.

La splendeur manifeste de ces plumes de dinosaures a donc soulevé une nouvelle hypothèse quant à l'origine des ailes: elles auraient été initialement sélectionnées parce que leurs motifs constituaient un message coloré bien visible. Peu à peu, certains dinosaures à plumes se seraient ensuite retrouvés avec des surfaces assez étendues pour tenir l'air.

UN SI HEUREUX HASARD

En d'autres termes, la capacité de planer, puis de voler, serait accidentelle. Un événement qui a très bien pu se produire à plusieurs reprises et parallèlement, quand des maniraptoriens de lignées différentes se sont mis à exploiter la portance qu'engendraient leurs bras ailés pour bondir et se percher en hauteur, pour sauter d'une branche à l'autre, voire pour s'élancer du haut d'un arbre. Finalement, des membres d'une de ces lignées ont acquis des traits adaptés au vol: une plus petite taille, des bras très allongés, de puissants muscles pectoraux, une large queue de plumes qui a remplacé leur longue queue. Ce sont eux qui ont donné les oiseaux actuels.

Ainsi, les plumes et les ailes s'inscrivent dans un cadre bien plus vaste que celui de l'évolution du vol. Les dinosaures si bien conservés du Liaoning montrent que de nombreuses caractéristiques singulières des oiseaux sont apparues des millions d'années avant les oiseaux, et pour des raisons sans rapport aucun avec le vol.

Il en est ainsi des longues et minces pattes se terminant par trois doigts, l'un des traits les plus caractéristiques des oiseaux actuels. Le registre

La transition entre dinosaures et oiseaux a couru sur des dizaines de millions d'années d'évolution. Elle a été si progressive qu'il n'existe pas de distinction claire entre « oiseaux » et « non-oiseaux »

22

fossile montre qu'elles sont apparues il y a plus de 230 millions d'années chez des dinosaures très primitifs. Cette émergence semble avoir fait partie d'un remodelage général du corps de certains d'entre eux, les transformant en animaux bipèdes courant très vite pour distancer des prédateurs ou rattraper des proies. Cette forme des membres inférieurs est l'une des caractéristiques des dinosaures expliquant qu'ils aient pu régner aussi longtemps.

Chez certains – les tout premiers membres de la dynastie des théropodes –, les clavicules gauche et droite ont fusionné pour constituer une nouvelle structure, le bréchet (l'os séparant les deux blancs d'un poulet rôti). Un changement apparemment mineur, mais qui a stabilisé la ceinture scapulaire (les os qui relient les membres supérieurs à la colonne vertébrale) : ainsi dotés, ces prédateurs furtifs ont mieux encaissé les contre-chocs se produisant lors de la saisie des proies. Les oiseaux, leurs descendants, ont profité de la présence du bréchet, puisque celui-ci se déforme comme un ressort et stocke de l'énergie dans les battements d'ailes.

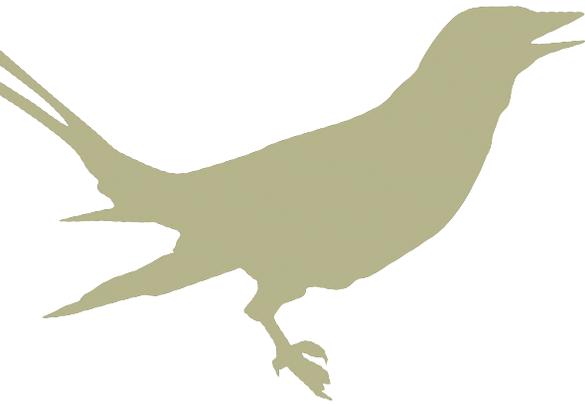
Deux autres éléments jouant un rôle important dans le vol sont la croissance rapide des oiseaux et leurs os creux. Ces caractéristiques ont aussi une origine profondément dinosaurienne. Beaucoup de dinosaures avaient en effet des os creux où se logeaient des sacs aériens,

révélateurs de poumons à circulation continue ultra-efficaces, car capables de prélever de l'oxygène dans l'air tant pendant l'inspiration que pendant l'expiration. C'est du reste ce type de poumon qui fournit aux oiseaux l'énergie nécessaire à leur mode de vie exigeant, tandis que les vides internes de leurs os allègent leur squelette pour le vol.

L'INTELLIGENCE EN HÉRITAGE

La petite taille des oiseaux – qui n'a rien à voir avec celle, massive, de *T. rex* et compagnie – est elle aussi apparue au sein de lignées bien antérieures (voir *Chérie, j'ai rétréci les dinosaures*, par E. Singer, page 24). On peut également faire remonter aux dinosaures certains traits neurologiques et comportementaux des oiseaux actuels. De nombreuses étapes clés de l'histoire de ces traits ont été découvertes dans le désert de Gobi, en Mongolie. Au cours du dernier quart de siècle, une équipe conjointe du Muséum américain d'histoire naturelle et de l'Académie mongole des sciences, dirigée notamment par Mark Norell et Mike Novacek, a rassemblé de nombreux fossiles significatifs à cet égard.

La plupart remontent au Crétacé supérieur, il y a entre 84 millions et 66 millions d'années. Ils livrent un nombre exceptionnel de détails sur la vie des dinosaures et des premiers oiseaux. On



trouve notamment toute une série de crânes bien conservés de *Velociraptor* et d'autres maniraptorien à plumes. Réalisées par Amy Balanoff, de l'université de Stony Brook, les tomographies à rayons X de ces spécimens révèlent que ces espèces avaient un volumineux cerveau dont la partie antérieure était étendue.

Un gros prosencéphale est ce qui explique les remarquables capacités cognitives des oiseaux. C'est en son sein que se loge l'« ordinateur de vol », en d'autres termes les circuits neuronaux grâce auxquels les oiseaux contrôlent si bien leurs déplacements dans les trois dimensions. Les chercheurs ignorent encore pourquoi les maniraptorien ont acquis plus d'intelligence, mais les fossiles montrent clairement que cela s'est produit bien avant l'apparition du vol.

Le plan d'organisation des oiseaux s'est donc construit en de nombreuses petites étapes. La transition entre dinosaures et oiseaux ne s'est pas produite d'un seul coup, mais plutôt au cours de dizaines de millions d'années d'évolution graduelle. Cette transition a d'ailleurs été si progressive qu'il n'existe pas de distinction claire entre « oiseaux » et « non-oiseaux ».

En définitive, les oiseaux sont donc un groupe particulier de dinosaures. Si, il y a quelque 125 millions d'années, je m'étais trouvé en ce lieu qui allait devenir Jinzhou, en train d'observer *Zhenyuanlong* battre frénétiquement

des ailes pour essayer d'échapper au nuage de cendres volcaniques qui allait l'ensevelir, il m'aurait fait l'impression d'un grand oiseau. Ces dinosaures remarquables ont adopté un mode de vie qui les a fait prospérer. Les quelque 10 000 espèces actuelles d'oiseaux représentent en effet une spectaculaire diversité de formes, qui va des oiseaux-mouches aux autruches. Qui plus est, les oiseaux ont été capables de survivre aux catastrophes de la fin du Crétacé, il y a quelque 66 millions d'années, ce qui n'a pas été le cas des autres dinosaures.

En définitive, il est fascinant de penser que, bien avant les oiseaux, un grand nombre de sélections et d'adaptations ont été à l'œuvre des dizaines de millions d'années durant, dont sont issus les théropodes non aviens, puis les théropodes aviens (les oiseaux). Si quelqu'un parmi nous avait pu être témoin de ce long processus évolutif, jamais il n'aurait vu venir le fait que l'accumulation de traits aidant ces dinosaures à garder la chaleur de leur corps ou à attirer un partenaire sexuel conduirait, un jour, à des organismes volants.

— L'auteur —

> **Steve Brusatte**
enseigne la paléontologie et la théorie de l'évolution à l'université d'Édimbourg, en Écosse.

— À lire —

> **D. J. Futuyma**, *How Birds Evolve : What Science Reveals about Their Origin, Lives & Diversity*, Princeton University Press, 2021

> **S. L. Brusatte**, *Le Triomphe et la chute des dinosaures : la nouvelle histoire d'un monde oublié*, Quanta, 2021.

> **S. L. Brusatte et al.**, The origin and diversification of birds, *Current biology*, 2015.

Voler est un privilège de poids plume.
Avant de prendre les airs, les lourds
ancêtres des oiseaux ont dû subir
une cure de miniaturisation.

24

Chérie, j'ai rétréci les dinosaures!

Emily Singer



Saurez-vous reconnaître les dinosaures
aviens dans cette collection de crânes ?

En bref

> Apparus dans le groupe des théropodes, les oiseaux sont des dinosaures dont le processus de miniaturisation s'est fait à rebours de leurs contemporains.	> Ce phénomène a d'abord été expliqué par la théorie du monstre prometteur, qui supposait des mutations génétiques aux conséquences de grande ampleur.	> En définitive, un petit nombre de changements évolutifs simples ont suffi pour assurer le succès de cette lignée.	> L'évolution a notamment favorisé, à l'âge adulte, le développement d'une forme de crâne proche de celle des juvéniles. Ce processus est connu sous le nom de «pédomorbose».
--	--	---	---

À qui sait voir, regarder une poule offre un voyage dans le temps. Car nos oiseaux modernes descendent des théropodes, un groupe de dinosaures bipèdes qui compta parmi ses membres l'imposant *Tyrannosaurus rex* et son plus modeste et néanmoins redoutable compère le *Velociraptor*. Parmi eux, les plus étroitement apparentés aux oiseaux pesaient jusqu'à 250 kilogrammes, des géants comparés aux actuels volatiles. Ils affichaient un large museau, de grandes dents et... pas grand-chose entre les oreilles! *Velociraptor* avait le crâne d'un coyote et le cerveau d'un pigeon.

Durant des décennies, pour seul lien entre oiseaux et dinosaures, les paléontologues n'ont disposé que du fossile d'*Archaeopteryx*, une créature hybride aux ailes garnies de plumes, avec des dents et une longue queue osseuse (voir *Comment ils ont pris la plume*, par S. Brusatte, page 14). Cet animal semblait avoir acquis ses attributs aviens (plumes, ailes et capacité de voler) en 10 millions d'années seulement. Un éclair, rapporté au rythme lent de l'évolution. «*Archaeopteryx* semblait avoir surgi d'emblée avec tous les caractères d'un oiseau moderne», se souvient le paléontologue Michael Benton, de l'université de Bristol, en Grande-Bretagne.

Pour expliquer ce petit miracle, des scientifiques invoquèrent une théorie dite «du monstre prometteur», selon laquelle une mutation de grande ampleur donne naissance à une nouvelle espèce, voire à un nouveau «grand groupe» d'êtres vivants en conduisant, en simplement une étape, à un nouveau plan d'organisation. Seuls des changements aussi substantiels étaient

à même de rendre compte, en si peu de temps, de la métamorphose d'un théropode de 150 kilogrammes en un oiseau préhistorique de la taille d'une hirondelle comme *Iberomesornis*.

UNE BOMBE À PLUMES

Mais, peu à peu, il devint évident que cette transition avait forcément été plus subtile. Dans les années 1990, l'afflux de nouveaux fossiles venus de Chine a fait l'effet d'une bombe... à plumes! Souvent dépourvus d'ailes, ces dinosaures arboraient des plumages allant de simples poils duveteux à des pennes entièrement articulées. En enrichissant les collections, ces «entre-deux» ont forcé les paléontologues à changer leur regard sur la transition des théropodes vers les oiseaux. Les plumes avaient évolué chez les dinosaures bien avant de devenir, comme on le croyait, l'apanage des oiseaux.

Grâce à de nouvelles analyses sophistiquées, l'idée que les traits aviaires ont évolué sur le long terme a pris corps. Steve Brusatte, de l'université d'Édimbourg, en Écosse, et ses collègues se sont notamment penchés sur des fossiles de coelurosauriens, sous-groupe de théropodes dont ont émergé *Archaeopteryx* et les oiseaux modernes. Ils ont traqué les changements dans un certain nombre de propriétés du squelette et conclu à l'absence d'un grand saut séparant les oiseaux des autres coelurosauriens. «L'oiseau n'est pas sorti du *T. rex* du jour au lendemain, fait remarquer le paléontologue. Au contraire, ses caractéristiques ont évolué une par une: d'abord la locomotion

bipède, puis les plumes, le bréchet, ensuite des plumes complexes, puis les ailes. La transition a été ininterrompue.»

Une fois les traits aviens en place, les oiseaux ont pris leur envol. Dès l'apparition d'*Archaeopteryx* et des premiers oiseaux, les coelurosaures ont évolué bien plus vite que les autres dinosaures. Au point qu'on peut parler de théorie du monstre prometteur à l'envers: la poussée évolutive n'a pas accouché des oiseaux. Ce sont les oiseaux qui ont boosté l'évolution. «On dirait qu'ils sont tombés sur un nouveau plan d'organisation du corps et une nouvelle écologie (le vol à petite échelle) tellement réussis qu'une véritable explosion évolutive a suivi.»

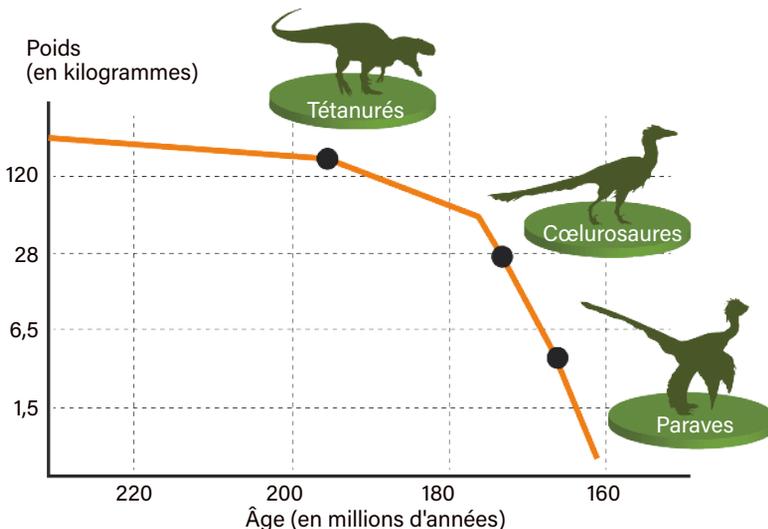
LES LOURDAUX CLOUÉS AU SOL

Bien qu'ailes et plumes apparaissent souvent comme le marqueur des oiseaux, la petite taille est tout aussi importante. Les recherches suggèrent que leurs ancêtres ont très vite rapetissé, signe qu'une moindre taille présentait des avantages évolutifs importants, au point peut-être d'avoir été un élément essentiel de l'évolution aviaire.

Tout comme la présence des plumes, le rapetissement a sans doute démarré bien avant l'évolution vers le stade oiseau. À la surprise des

paléontologues, certains coelurosaures ont commencé à fondre il y a 200 millions d'années – soit 50 millions avant l'apparition d'*Archaeopteryx*. À ce moment-là, dans les autres lignées, la plupart des dinosaures tendaient plutôt à grossir. «Chez eux, la miniaturisation est inhabituelle», reconnaît Michael Benton.

Elle a même accéléré lorsque les ailes sont apparues et que les ancêtres des oiseaux ont expérimenté le vol plané. Des calculs ont montré que cette lignée, nommée «paraves», a rapetissé 160 fois plus vite que les autres lignées de dinosaures ne parvenaient à croître. Cette rapide miniaturisation laisse penser que des oiseaux plus petits jouissaient d'un fort avantage évolutif sur les autres. «Peut-être parce que cela leur ouvrait d'autres habitats, d'autres façons de vivre, ou que cela était lié à un changement dans la physiologie ou la croissance», se hasarde Steve Brusatte. Selon Michael Benton, une petite taille se serait révélée un atout lorsque les ancêtres des oiseaux ont gagné les arbres, à la fois abris et sources de nourriture. Quelles qu'en soient les raisons, le rapetissement fut un préalable utile au vol, qui exige chez les oiseaux, notamment lorsqu'il est battu, un rapport entre la surface alaire et le poids bien particulier. Rapetisser était nécessaire pour prendre les airs autrement qu'à l'occasion d'un petit vol plané.



Quand la plupart des lignées de dinosaures favorisaient une taille croissante, celle des dinosaures aviens (les futurs oiseaux, courbe orange ci-contre) a pris le chemin inverse il y a environ 200 millions d'années.

En somme, les oiseaux ont tout de minidinosaurés, infantiles mais capables de se reproduire!

28

Une autre surprise attendait les chercheurs. Dès la fin des années 2000, Arkhat Abzhanov s'est plongé, littéralement, dans les œufs d'alligators. Alors à l'université Harvard, il partait du principe que, puisque les alligators partagent un ancêtre commun avec les dinosaurés, ils feraient un point de comparaison utile avec les oiseaux – desquels ils sont plus proches que les lézards, rappelons-le. Bien qu'il étudiait plutôt les vertèbres, ce fut la forme des crânes qui le surprit : les embryons d'alligators avaient des têtes de poulets. Une même similitude le frappa chez les bébés dinosaurés fossilisés : ils ressemblaient à des oiseaux adultes. Avec ces deux observations en tête, le biologiste émit l'idée que, peut-être, les oiseaux se sont détachés des dinosaurés en interrompant précocement leur patron de développement.

Pour tester l'hypothèse, il s'est associé au paléontologue Mark Norell, du musée américain d'Histoire naturelle de New York, et à Bhart-Anjan Bhullar, aujourd'hui à l'université Yale, pour éplucher les collections mondiales, en quête d'anciens oiseaux tel *Archaeopteryx* et de fossiles d'œufs de dinosaurés morts au nid. Ils ont tout particulièrement examiné les transformations de la forme du crâne à mesure que les dinosaurés se muaient en oiseaux. Au fil du temps, ils ont constaté que la face s'aplatissait et que les yeux, le cerveau et le bec s'agrandissaient. «Les premiers oiseaux étaient presque identiques aux embryons tardifs des *Velociraptors*», note Arkhat Abzhanov. En somme, les oiseaux ont tout de minidinosaurés, infantiles mais capables de se reproduire!

Du point de vue de l'évolution, ce processus, connu sous le nom de «pédomorphyse», est diablement efficace. Au lieu d'inventer quelque chose de neuf, il tire parti de ce qui est déjà, en l'étendant. «L'évolution procède de façon bien plus élégante que nous ne le pensions, juge Bhart-Anjan Bhullar. Les innombrables changements à l'intérieur du crâne des oiseaux seraient bien dus à la seule pédomorphyse et à un unique jeu de changements moléculaires à un stade embryonnaire précoce.»

COMME DEUX DOIGTS AU MILIEU DE LA FACE

Pourquoi une telle importance de la pédomorphyse dans l'évolution des oiseaux? Parce qu'elle a pu guider la miniaturisation... à moins que ce ne soit l'inverse. Des changements de gabarit sont souvent liés à des changements dans le développement, de sorte que la sélection de ce caractère a pu interrompre la progression normale vers la forme adulte. «Une bonne façon de couper court à une séquence de développement est d'arrêter de croître, en restant petit», affirme Michael Benton. Un crâne de bébé au stade adulte expliquerait aussi l'augmentation de la taille du cerveau des oiseaux, puisque les juvéniles ont, par rapport à leur corps, une plus grosse tête que les adultes. «Une excellente façon d'améliorer la taille du cerveau est de retenir l'adulte à une taille d'enfant», conclut le scientifique.

De plus, la pédomorphyse a pu aider à faire du crâne un terrain vierge à partir duquel la sélection naturelle a recréé de nouvelles structures.

bloqué, au milieu de la face, l'expression de certains gènes chez des embryons de poulets. Résultat? Les embryons en question avaient des faciès dinosauriens. Ajustements moléculaires simples, mais transformations morphologiques majeures. «Les oiseaux ont détourné des outils déjà existants pour se refaire une face toute neuve», résume Arkhat Abzhanov.

Là encore, ces résultats défient la théorie du monstre prometteur, cette fois à l'échelle génétique. Pour créer le bec, nul besoin de bond évolutif ou de mutations génétiques à grande échelle. Les mêmes forces qui guident la microévolution au sein des espèces servent aussi la macro-évolution, c'est-à-dire l'apparition de caractères entièrement nouveaux ou de nouveaux groupes d'espèces. Autrement dit, des changements minimes dans la régulation des gènes ont conduit à la fois à l'émergence du bec, lequel a évolué sur des millions d'années, et à la diversité des formes de becs, laquelle se modifie parfois en seulement quelques générations. Maintenant que vous le savez, il ne tient qu'à vous de changer votre regard sur les poules.

En effaçant le museau, elle a fait place nette à l'un des traits les plus importants: le bec.

La science ne déchiffrera jamais dans le détail comment les dinosaures ont évolué vers les oiseaux ou quel ensemble de caractères a été nécessaire, tout cela est trop lointain. Mais en croisant trois domaines (évolution, génétique et biologie du développement), elle commence à explorer comment des fonctions précises ont vu le jour.

Le bec est ainsi une structure remarquable, utilisée pour se nourrir, se nettoyer, aménager un nid et prendre soin des jeunes. Si Arkhat Abzhanov se passionne pour cet organe, c'est parce qu'il pense que le succès évolutif généralisé des oiseaux tient autant au vol qu'à l'incroyable diversité des becs. Pour reprendre ses mots: «Les oiseaux modernes ont évolué avec deux doigts au milieu de la face.» Dans ses travaux, il a montré comment de menus ajustements génétiques redonnent à un oiseau un faciès de dinosaure.

Chez les oiseaux, deux os fusionnent pour former le bec. Rien de tel chez les dinosaures, alligators et la plupart des autres vertébrés chez qui ces os demeurent distincts et servent à l'architecture de la face. Pour saisir cette singularité, les chercheurs ont cartographié l'activité de deux gènes, exprimés dans ces os, chez un large spectre d'animaux allant des souris aux tortues en passant par les émeus. Chez les reptiles et les mammifères, l'activité des gènes se concentre sur deux zones, de part et d'autre de la future cavité nasale. Alors que chez les oiseaux la zone est bien plus étendue et localisée en haut de la face. À l'aide d'inhibiteurs chimiques, ils ont

— L'autrice —

> Emily Singer

est éditrice à la fondation Simons, qui publie le magazine en ligne *Quanta*, où elle traite des neurosciences.

Cet article est la traduction actualisée de «How Dinosaurs Shrank and Became Birds», paru sur *Quantamagazine.org*, le 12 juin 2015.

— À lire —

> **C. J. Rubin et al.**, Rapid adaptive radiation of Darwin's finches depends on ancestral genetic modules, *Science Advances*, 2022.

> **L. Xing et al.**, An exquisitely preserved in-ovo theropod dinosaur embryo sheds light on avian-like prehatching postures, *iScience*, 2022.

> **D. Ksepka et al.**, Tempo and pattern of avian brain size evolution, *Current Biology*, 2020.

> **B. A. Bhullar et al.**, How to make a bird skull: Major transitions in the evolution of the avian cranium, paedomorphosis, and the beak as a surrogate hand, *Integrative and Comparative Biology*, 2016.

Du colibri au vautour, les oiseaux actuels sont incroyablement variés. Pourtant, cette diversité cache une évolution lente, celle de leur crâne. Explication.

30

La tête de linotte, un paradoxe évolutif

Kate Wong

Chez les oiseaux, le crâne n'a pas connu de forte explosion évolutive.



En bref

> On a longtemps cru que les oiseaux avaient connu une explosion évolutive à la fin du Crétacé, au moment de l'extinction de masse qui a entraîné la disparition des dinosaures.

> Ce ne serait pas le cas : une étude fondée sur l'analyse de nombreux crânes a au contraire montré que, au moins sur cette partie du squelette, l'évolution des oiseaux a plutôt été lente.

> L'explication est sans doute à chercher dans le peu d'avantages évolutifs qu'aurait procuré une diversité de crânes, en comparaison avec celles d'autres caractéristiques, comme les plumes ou le bec.

32

Lors du confinement imposé par le Covid-19, je me suis tournée vers une activité qui ne m'avait jamais particulièrement attirée auparavant : l'ornithologie. J'ai nettoyé et rempli une mangeoire dans le petit jardin attenant à ma maison, et j'ai attendu, armée de mon café et de mes jumelles. Les jours passant, j'ai appris à identifier les espèces selon la taille, la couleur, la forme du bec, le type de chant... Au dernier compte, j'avais recensé 39 espèces : les chardonnerets qui se rassemblent autour de la mangeoire, les grands pics qui tambourinent contre le tronc des arbres, les dindons qui se pavent sur la pelouse, les colibris à gorge rubis, *Archilochus colubris*, au vol stationnaire devant les fleurs, les buses à épaulettes, *Buteo lineatus*, planant haut dans le ciel. Je ne m'attendais pas à une telle diversité, et pourtant, celle que je vois de ma fenêtre n'est qu'une infime partie de la variété des formes aviaires. Avec plus de 10 000 espèces vivant aujourd'hui, les oiseaux constituent l'un des groupes les plus diversifiés de vertébrés (qui comptent 70 000 espèces au total) sur Terre. Comment expliquer un tel succès ?

DINOSAURES SURVIVANTS

Les oiseaux sont des dinosaures, la seule lignée à avoir survécu jusqu'à nos jours. Ils sont apparus au Jurassique, il y a entre 200 millions et 150 millions d'années, à partir des théropodes, un groupe de dinosaures carnivores et bipèdes dont les *Tyrannosaurus rex* et les *Velociraptor* sont les plus célèbres représentants.

Pendant des dizaines de millions d'années, les oiseaux ont évolué aux côtés des autres dinosaures (dits, par contraste, « non aviens »), se diversifiant en quelques espèces à petits corps, à croissance rapide et capables de voler grâce à leurs ailes plumées, ainsi qu'en quelques plus grandes espèces inaptées au vol. L'un de ces groupes, les néornithes, ou « nouveaux oiseaux », qui se distinguent par la fusion de leurs pieds et de leurs chevilles et par certaines caractéristiques des os qui soutiennent les ailes, a finalement donné naissance aux oiseaux modernes.

Les scientifiques voient dans la diversité des oiseaux le résultat d'une explosion évolutive qui se serait produite après le jour fatidique, il y a 66 millions d'années, où un astéroïde géant a frappé la Terre, condamnant 75 % des espèces végétales et animales, y compris les dinosaures non aviens et de nombreux groupes d'oiseaux. On ignore pourquoi la lignée des néornithes a survécu à cette apocalypse, bien que la découverte récente en Belgique d'*Asteriornis maastrichtensis*, un oiseau fossile de 66,7 millions d'années apparenté aux canards et aux poulets actuels, suggère l'idée qu'être petit et vivre dans un environnement côtier ait pu aider.

Quoi qu'il en soit, on a longtemps cru qu'après l'extinction massive de la fin du Crétacé, les oiseaux néornithes avaient eu le champ libre. Libérés de la concurrence des autres dinosaures, sans parler de celle d'autres vertébrés comme les ptérosaures (ces reptiles volants qui ont longtemps régné sur le ciel), les oiseaux ont brusquement connu une radiation évolutive qui s'est



1



2



3



4

traduite par une multitude de formes s'envolant aussitôt conquérir les nombreuses niches écologiques laissées vacantes.

ATTENTION, RALENTISSEMENT

Pourtant, Ryan Felice, de l'University College de Londres, Anjali Goswami, du Muséum d'histoire naturelle de Londres, et leurs collègues ont remis en cause ce scénario sur la base de l'analyse de centaines de crânes d'oiseaux et de dinosaures. Leurs résultats indiquent que le rythme de l'évolution des oiseaux, du moins de leur crâne, s'est en fait considérablement ralenti *après* l'extinction massive par rapport à celui qui prévalait *avant*, chez leurs prédécesseurs, donc.

Les fossiles qui préservent l'intégralité du squelette d'un animal sont extrêmement rares, de sorte que les études comparatives de fossiles ont tendance à se concentrer sur une région particulière du corps. L'équipe s'est intéressée aux crânes, car ils remplissent de nombreuses fonctions, qu'il s'agisse d'héberger les organes sensoriels, de permettre l'alimentation, d'attirer les partenaires ou de se défendre. «Les oiseaux présentent à première vue une incroyable diversité crânienne», observe Ryan Felice, en invitant à comparer éperviers et colibris, pigeons et pélicans. La question posée, loin d'être anecdotique, est celle de savoir si les crânes des oiseaux ont évolué plus rapidement, ou non, que ceux de leurs ancêtres dinosaures non aviens. Et le biologiste de préciser: «La dynamique évolutive sous-jacente est-elle un processus rapide, explosif, ou bien un phénomène lent et régulier?»

Pour répondre, l'équipe a analysé les reconstitutions 3D à haute résolution de 391 crânes bien conservés d'oiseaux modernes et de dinosaures éteints. Le plus souvent, les comparaisons de crânes reposent sur l'utilisation de points de

repère établis, comme les sutures et les bosses, que les différentes espèces étudiées partagent. Mais plus le groupe étudié est important, plus ces points sont rares.

«Notre approche diffère, car elle prend certes ces points de repère, mais les utilise comme points d'ancrage pour des courbes qui les relient et, ce faisant, dessinent et délimitent des régions sur les os du crâne, explique Anjali Goswami. Notre approche automatisée, géomorphologique, part d'un modèle générique de points puis l'adapte exactement à tous les spécimens de l'ensemble de données en utilisant les points de repère et les courbes pour identifier les régions d'intérêt. Ainsi, vous obtenez des points répartis sur la surface d'un os de façon cohérente, que ce soit la structure osseuse plate du bec d'un canard ou le museau hérissé de dents d'un *T. rex*.»

CHANGEMENT DE PRIORITÉ

Les chercheurs ont alors découvert que toutes les régions du crâne des dinosaures ont évolué de 1,5 à 3 fois plus vite que les zones équivalentes chez les oiseaux. Après l'extinction qui a mis fin à l'ère Mésozoïque et marqué le début du Cénozoïque, les oiseaux ont formé la plupart des grands groupes modernes, des colibris aux pingouins, des oiseaux de proie aux oiseaux chanteurs. Mais cette diversité a évolué bien plus lentement que celle de leurs prédécesseurs dinosaures du Mésozoïque. «La vitesse d'évolution morphologique diminue juste au moment où ils prennent leur envol radiatif», résume Anjali Goswami.

Pourquoi cette soudaine décélération? Elle refléterait un changement de priorités dans la fonction du crâne. Alors que ceux des dinosaures étaient dotés de structures élaborées pour la parade et le combat, ainsi que de dispositifs consacrés à l'alimentation complexes nécessitant

Les oiseaux ont évolué pour exploiter une grande variété de niches écologiques, ici une buse à épaulettes (1), un colibri (2), un casoar à casque (3) et un flamant rose (4). Mais cette diversité ne résulte pas d'une explosion évolutive survenue au lendemain de l'extinction de la fin du Crétacé; elle serait plutôt le fruit d'une évolution lente, au moins dans la forme du crâne.

TRÈS TÔT DANS LEUR ÉVOLUTION, LES OISEAUX AURAIENT TROUVÉ UN MODÈLE DE TÊTE QUI LEUR CONVENAIT

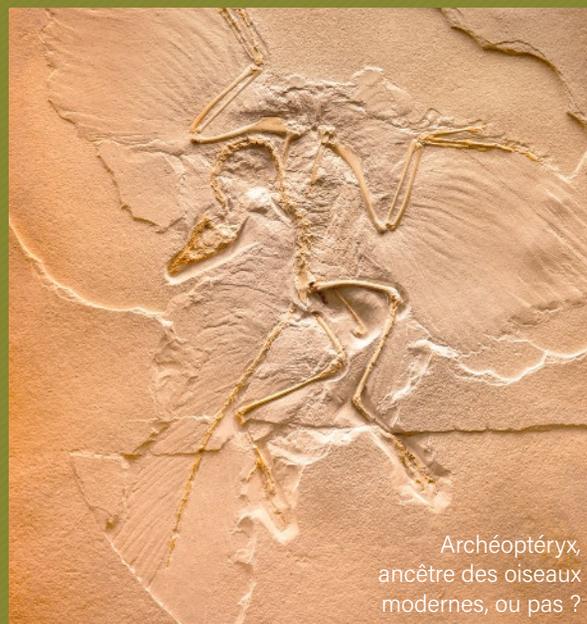
de grandes surfaces pour la fixation des mâchoires et des muscles, les crânes des oiseaux sont principalement dévolus à l'hébergement et à la protection du cerveau relativement volumineux de ces animaux, et rien d'autre.

34

PRISE DE BEC

La découverte que le crâne des dinosaures évoluait plus rapidement que celui des oiseaux modernes semble étrange compte tenu de la variété des becs d'oiseaux actuels, comme ceux des spatules, des flamants roses, des pélicans... explique Daniel Ksepka, du musée Bruce, à Greenwich, aux États-Unis. Mais un examen plus approfondi révèle que ces becs distinctifs sont l'exception plutôt que la règle. «Il existe de nombreux groupes où des dizaines d'espèces apparentées partagent une forme de crâne assez similaire, comme les fauveltes ou les perroquets, ce qui suggère une évolution relativement faible de cette partie du squelette», observe l'ornithologue. L'incroyable diversité des oiseaux ne serait donc qu'apparente.

En revanche, chez certains groupes de dinosaures, l'évolution du crâne était assurément rapide, par exemple chez les cératopsiens, comme le tricératops et ses congénères : «Chaque espèce avait une disposition unique de cornes et de crêtes. Et celles-ci semblent avoir évolué rapidement en raison de leur valeur pour attirer les partenaires», détaille Daniel Ksepka. De nombreux dinosaures avaient des ornements de crâne élaborés, mais ils sont très rares chez les oiseaux, le



Archéoptéryx,
ancêtre des oiseaux
modernes, ou pas ?

UNE HISTOIRE À TIRE D'AILE

L'archéoptéryx, qui vivait il y a 150 millions d'années, a longtemps été considéré comme le plus ancien oiseau connu, mais sa position phylogénique est aujourd'hui controversée. Pour certains, il serait plus un membre des déinonychosaures, un groupe de théropodes différent de celui qui a conduit aux oiseaux actuels. Le plus ancien «oiseau» serait *Asteriornis maastrichtensis*, qui vivait il y a environ 67 millions d'années. Le groupe de théropodes dont sont issus les oiseaux s'est subdivisé en deux branches au Trias, les *Enantiornithomorpha*, emportés à la fin du Crétacé, et les *Ornithurae*, dont seuls des néornithes survivront à l'astéroïde : les paléognathae (des oiseaux inaptes au vol comme les autruches, les kiwis, les nandous...) et des néognathes. Parmi ces derniers figurent les ansériformes (canards et oies), les galliformes (poules, pintades, cailles...) et les néoaves, ces derniers rassemblant 95 % des espèces actuelles, du moineau au condor des Andes.

casoar étant une exception impressionnante», ajoute-t-il. De fait, le casoar à casque *Casuarius casuarius*, un parent de l'émeu vivant dans les forêts tropicales de Papouasie-Nouvelle-Guinée et du nord-est de l'Australie, a une crête osseuse proéminente au sommet de la tête (*voir la photographie page 33*). «Il est probable que les plumes aient pris le relais pour la communication avec les congénères, car beaucoup d'oiseaux modernes ont des crânes de forme ordinaire, mais ornés de magnifiques crêtes de plumes différentes selon les espèces. Il suffit de regarder les cardinaux et les geais bleus de nos jardins.»

ÉVOLUTION DIFFÉRENCIÉE

La découverte de l'évolution relativement lente des crânes d'oiseaux «est à l'opposé de ce que nous savons du reste du squelette», déclare Stephen Brusatte, de l'université d'Édimbourg. Ses travaux portant notamment sur d'autres parties du corps ont révélé que ces régions ont évolué plus rapidement chez les oiseaux que chez les autres dinosaures. «On en déduit, je pense, que l'origine des oiseaux a été motivée par des changements rapides et remarquables du squelette, notamment la transformation des bras en ailes pour le vol. La tête a joué un rôle moins important dans cette transition, et elle a probablement pris du retard par rapport au reste.»

Très tôt dans leur évolution, les oiseaux auraient trouvé un modèle de tête qui leur convenait, avec des caractéristiques telles qu'un bec, de grands yeux et un gros cerveau. En d'autres termes, les oiseaux n'ont pas eu besoin de changer radicalement l'un de ces éléments pour s'adapter à différentes niches. Selon Stephen Brusatte, après s'être séparés des autres dinosaures et être partis à la conquête du ciel, les oiseaux se sont adaptés à de nouvelles niches en changeant la taille de leur corps, la forme de leurs ailes et leur style de vol plus que leur tête.

Une telle évolution en mosaïque, dans laquelle des parties du corps évoluent à des rythmes différents des autres, est connue pour s'être produite chez de nombreux organismes, y compris les humains. Ainsi, l'évolution rapide du crâne des cératopsiens contraste fortement avec les changements à peine perceptibles dans les os de leurs membres. Les fauvelles modernes, quant à elles, présentent très peu de changements dans la forme

du crâne, mais ont évolué vers «un kaléidoscope de motifs colorés».

Mais Anjali Goswami pense que d'autres parties du squelette des oiseaux ont aussi évolué plutôt lentement. Les dinosaures non aviens sont passés plusieurs fois au cours de leur évolution de la bipédie à la quadrupédie et ont utilisé diversément leurs membres antérieurs – pensez aux bras chétifs des *T. rex* en comparaison avec les «troncs d'arbres» des titanosaures. En revanche, une fois que les oiseaux se sont spécialisés dans le vol et que leurs membres antérieurs se sont transformés en ailes, parmi d'autres changements, ils n'ont jamais vraiment évolué vers des plans corporels complètement nouveaux, probablement en raison des contraintes de développement ou fonctionnelles.

Bien sûr, ce ralentissement ne rend pas les oiseaux moins spectaculaires. Ils ont survécu au feu et au soufre, ont conquis les cieux et se sont diversifiés pour former l'éblouissant éventail de merveilles à plumes qui partagent la planète avec nous aujourd'hui. Patience et longueur de temps (dans l'évolution des oiseaux) ont fait plus que force ni que rage (dans celle des dinosaures non aviens) puisque, en définitive, seuls les premiers sont encore là...

— L'autrice —

> Kate Wong

rédaCTRICE au magazine *Scientific American*, où elle couvre l'actualité en science de l'évolution et en écologie.

Ce texte est une traduction de l'article « How birds evolved their incredible diversity », publié sur le site scientificamerican.com le 24 août 2020.

— À lire —

> G. Navalón et al.,

Environmental signal in the evolutionary diversification of bird skeletons, *Nature*, 2022.

> M. Wang et al., Insight into the evolutionary assemblage of cranial kinesis from a Cretaceous bird, *eLife*, 2022.

> D. Field et al., Late Cretaceous neornithine from Europe illuminates the origins of crown birds, *Nature*, 2020.

> R. Felice et al., Decelerated dinosaur skull evolution with the origin of birds, *Plos Biology*, 2020.

Soixante ans après le « Printemps silencieux », de Rachel Carlson, presque 30 % de la gent ailée a disparu aux États-Unis. En cause: l'usage des pesticides. Mais pas seulement.

On achève bien les oiseaux

Naomi Oreskes



En 1962, la parution du best-seller de Rachel Carson, *Printemps silencieux*, consacré aux menaces sur l'environnement, marqua une embellie du courant écologiste aux États-Unis. L'interdiction du DDT en 1972 par la toute jeune Agence de protection de l'environnement (EPA) lui est directement imputable. Ce livre «a changé le cours de l'histoire», selon Ernest Gruening, l'un des tout premiers sénateurs de l'Alaska. Alors que cette œuvre vient de souffler ses soixante bougies, l'occasion est bonne d'examiner si l'un de ses grands objectifs a été atteint: protéger la vie sauvage, en particulier celle des oiseaux.

Rachel Carson s'est emparée d'un sujet ardu – les dégâts des pesticides rémanents – qu'elle a traduit en une formule simple et poétique: un printemps sans chants d'oiseaux. Elle nous a demandé d'imaginer ce que serait notre monde si, au réveil, nous étions privés de leurs mélodies. Avec élégance, elle nous a fait éprouver cette perte. Mais avons-nous réagi de façon adéquate à l'avertissement?

À de rares exceptions près, la réponse est «non» – et les oiseaux en ont payé le prix. En 2019, une étude dirigée par l'ornithologue Kenneth Rosenberg, de l'université Cornell, a montré que, en Amérique du Nord, il y a 29% d'oiseaux en moins par rapport à 1970. L'étude était remarquable par son ampleur: les données concernaient quantité d'espèces et de biomes, et les comptages ont été validés par des approches variées. Devant les faits, la société Audubon, qui est un peu l'équivalent américain de la Ligue de protection des oiseaux (LPO) en France, a parlé de «tableau qui

laisse songeur» sur le déclin aviaire généralisé. Les prairies ont payé le prix fort, avec une perte documentée de 700 millions d'individus en âge de se reproduire, soit une chute supérieure à 50%. À une seule exception, les principaux biomes sont concernés, et presque toutes les espèces. Au total, près de 3 milliards d'individus évanouis, un nombre qui a conduit au lancement d'une campagne de conseils pour protéger ces animaux: «mettez des autocollants aux fenêtres» et «gardez vos chats à l'intérieur» pour les deux principaux.

UNE CAUSE PERDUE ?

Au vu de tels nombres, il serait tentant de conclure que Rachel Carson, malgré sa prose brillante, a échoué à protéger les oiseaux. En outre, ce qu'elle évoque n'est qu'une partie du terrible déclin de la biodiversité causé par les activités humaines. Selon la Plateforme intergouvernementale scientifique et politique sur la biodiversité et les services écosystémiques (IPBES), plus de 40% des espèces d'amphibiens, près de 33% des coraux de récifs et plus d'un tiers des mammifères marins sont en danger. Plus d'un million d'espèces sont menacées. Notre bien-être l'est aussi, au point selon la plateforme que «nous érodons les fondations même de nos économies, nos moyens de subsistance, notre sécurité alimentaire, notre santé et notre qualité de vie dans le monde entier».

Pourtant, en dépit de ses conclusions, l'étude de 2019 suggère aussi que la protection de la biodiversité, et donc de nous-mêmes, n'est pas une cause perdue. Dans le tableau sombre dépeint

La France encore plus mal lotie

En seulement trente ans, les villes et campagnes françaises ont perdu elles aussi près de 30 % de leurs oiseaux. Chaque année, depuis 1989, un large réseau d'observateurs fait remonter ses comptages dans le cadre du programme *Suivi temporel des oiseaux communs*, lancé par le Muséum national d'histoire naturelle. Publié avec la LPO et l'OFB (Office français de la biodiversité), le bilan 1989-2019, dernier en date, constatait que les populations de 43 espèces régressent (hirondelle de fenêtres, chardonneret élégant, tourterelle des bois...), tandis que 32 sont en expansion (pigeon ramier, mésange bleue, geai des chênes...). Celles dont la démographie progresse, les plus adaptables, ne peuvent faire oublier que cela traduit une uniformisation de la vie sauvage. Les oiseaux des milieux agricoles (alouette des champs, perdrix grise...) sont encore plus touchés que les autres. Sont incriminées : l'utilisation des pesticides comme les néonicotinoïdes, qui ont décimé les insectes, mais aussi la disparition des haies, les rénovations des façades qui combrent les cavités, la pollution due aux transports et activités industrielles, la prolifération des chats domestiques...

par les scientifiques, un biome fait exception : les zones humides. La population d'oiseaux s'y est accrue de 13%. Quelle différence avec les autres milieux ? L'une des singularités des zones humides est qu'elles sont de longue date préservées des excès de l'industrie. De multiples lois les protègent, à toutes les échelles (fédérale, États, voire tribus). Certaines reconnaissent leurs valeurs écologiques comme prioritaires, c'est le cas dans le Massachusetts du puissant *Wetlands Protection Act*. D'autres les ont sauvegardées pour leur importance dans la navigation, le commerce, les pêcheries, la prévention des inondations ou l'adduction en eau potable. Par exemple, le *Rivers and Harbors Appropriation Act* (1899), qui a préservé les zones humides en les intégrant aux voies navigables.

Autre exception encourageante : les rapaces. Leur population a crû de 15 millions d'individus. Quand *Printemps silencieux* a paru, le pygargue à tête blanche, l'un des symboles des États-Unis, était sur le point de s'éteindre, mais l'interdiction du DDT lui a sauvé la mise, et il s'est remis en grande partie. Selon la société Audubon, « les statistiques montrent que la gestion de la vie sauvage, la restauration des habitats et l'action politique aident réellement à sauver des espèces ». La menace actuelle sur la biodiversité est désormais bien étayée par les chercheurs. Mais ces mêmes données montrent que, si on les prend en considération et qu'on agit, nous sommes capables de changer le cours des choses.

— L'autrice —

> **Naomi Oreskes**
est historienne des sciences à l'université Harvard, aux États-Unis.

Cet article est la traduction de « 60 years after Silent Spring warned us, birds – and humanity – are still in trouble », paru sur [Scientificamerican.com](https://www.scientificamerican.com) le 1^{er} avril 2022.

— À lire —

> **B. Fontaine et al.**, *Suivi des oiseaux communs en France. 1989/2019, 30 ans de suivis participatifs !*, 2021.
<https://bit.ly/STOC-2021>

> **K. V. Rosenberg et al.**, *Decline of the North American avifauna*, *Science*, 2019.

> **J. Mock**, *North America has lost more than 1 in 4 birds in last 50 years, new study says*, 2019.
www.audubon.org

LES maîtres du ciel

Ils sont partout! Où qu'on aille, y compris dans des contrées à ne pas mettre un humain dehors, les oiseaux sont là. Les îles du bout du monde? Pleines de divins plumages! Les pôles? Les oiseaux y endurent des froids inouïs. Les océans? Le royaume des frégates et des albatros. Même les hauts sommets, voire les altitudes tutoyées par nos Airbus, ne leur font pas peur. L'aptitude au vol a grandement aidé ces animaux à peupler tous les milieux. Mais elle ne permettrait rien d'autre que du cabotage s'ils ne disposaient, en plus, du moyen de se repérer au soleil, aux étoiles, et même de « voir » le champ magnétique terrestre. Ainsi outillée, une barge rousse vient d'accomplir 13560 kilomètres d'un trait, sans boire ni manger, de l'Alaska à la Tasmanie. Respect!



02

Les oiseaux sont des virtuoses
de la voltige aérienne, capables
des plus improbables manœuvres
en vol. Leur secret ?
Une maîtrise de la géométrie.

42

L'as des as

Yasemin Saplakoglu



On comprend de mieux en mieux comment les ailes offrent aux oiseaux leur extraordinaire virtuosité, comme ici celle d'un colibri.

En bref

> En vol, la capacité manœuvrière des oiseaux est longtemps restée un mystère.

> Ingénieurs et biologistes se sont associés pour mieux la comprendre.

> La clé réside dans l'alternance entre phases de vol stable et instable durant lesquelles les propriétés aérodynamiques varient.

> On espère exploiter ces résultats pour concevoir des engins volants plus agiles.

44

Dans une pièce rectangulaire tapissée d'un filet de camouflage, quatre buses de Harris (*Parabuteo unicinctus*), aussi nommées «buses à croupion blanc», enchaînent les allers-retours entre des perchoirs recouverts d'herbe tandis que des scientifiques enregistrent leurs battements d'ailes. L'objectif: étudier le vol et, plus précisément ici, leur «atterrissage».

Durant plus de 1500 traversées, les quatre rapaces ont presque toujours emprunté le même chemin. Le plus rapide? Non. Le plus économe en énergie? Non plus. Celui grâce auquel ils se perchaient le plus sûrement et avec le plus de maîtrise.

Comme Graham Taylor, de l'université d'Oxford, et ses collègues l'ont récemment décrit, les buses volent en arc de cercle, battant rapidement des ailes pour accélérer et plonger, puis remontent brusquement en planant, en étirant leurs ailes pour ralentir avant de s'agripper au perchoir.

UN SECRET LONGTEMPS GARDÉ

«Ils sont fascinants», s'enthousiasme Lydia France, de l'institut Alan-Turing, qui a conçu les expériences. La faculté de ces oiseaux à atterrir en s'arrêtant presque en plein vol est



De gauche à droite : © Nasa, © cvestan/Shutterstock
Page de droite : © Harry Collins Photography/Shutterstock

sans pareil! «L'évolution a créé un appareil de vol bien plus complexe que tout ce que nous avons jamais imaginé», constate Samik Bhattacharya, de l'université de Floride centrale. Les raisons pour lesquelles les avions ne savent pas rivaliser avec la capacité manœuvrière des oiseaux ne relèvent pas d'une simple question d'ingénierie. Bien que les oiseaux aient été méticuleusement observés tout au long de l'histoire et qu'ils aient inspiré des machines volantes à Léonard de Vinci, la biomécanique qui explique les prouesses des oiseaux reste en grande partie un mystère.

Une étude marquante, parue en mars 2022, a toutefois commencé à changer la donne. Christina Harvey, de l'université du Michigan, et ses collègues ont découvert que la plupart des oiseaux transforment leurs ailes en plein vol pour passer du vol souple d'un avion de ligne au vol acrobatique digne d'un avion de chasse. Leurs travaux montrent que les oiseaux modifient complètement à la fois les caractéristiques aérodynamiques qui régissent la façon dont l'air se déplace autour de leurs ailes et les caractéristiques inertielles de leur corps qui déterminent la façon dont ils chutent pour effectuer des manœuvres rapides.

Ces résultats ont révélé des facteurs importants, inconnus jusqu'alors, qui contribuent aux acrobaties des oiseaux et même certaines des

pressions évolutives qui ont rendu les oiseaux si compétents en matière de vol. Ils aideront également les ingénieurs à concevoir des avions aussi maniables et adaptables qu'un oiseau.

«TOP GUN» ET LE GOÉLAND BLANC

Christina Harvey décrit ses travaux sur le vol des oiseaux comme «l'analyse de quelque chose qui relève de la magie». Ce n'était pourtant pas une vocation. Un jour de 2016, assise sur une corniche rocheuse après une courte randonnée, elle s'interroge sur un futur sujet d'études. Entourée de blancs goélands, elle songe: «Ils volent vraiment bien... si l'on oublie à quel point ils nous agacent à voleter autour de nous.»

L'oiseau marin est toutefois devenu ce qu'elle appelle son «étincelle» dès lors qu'elle a cherché à en savoir plus sur leur vol. Mais force fut de constater que la littérature est particulièrement lacunaire sur le sujet. Elle a néanmoins été profondément inspirée par des travaux de Graham Taylor qui, en 2001, posaient une première base théorique sur la façon dont les oiseaux, et les autres animaux volants, parviennent à stabiliser leur trajectoire.

Cette stabilité résulte d'une combinaison de caractéristiques internes, une sorte de résistance innée aux perturbations, et de contrôle externe, c'est-à-dire une capacité active à s'adapter en

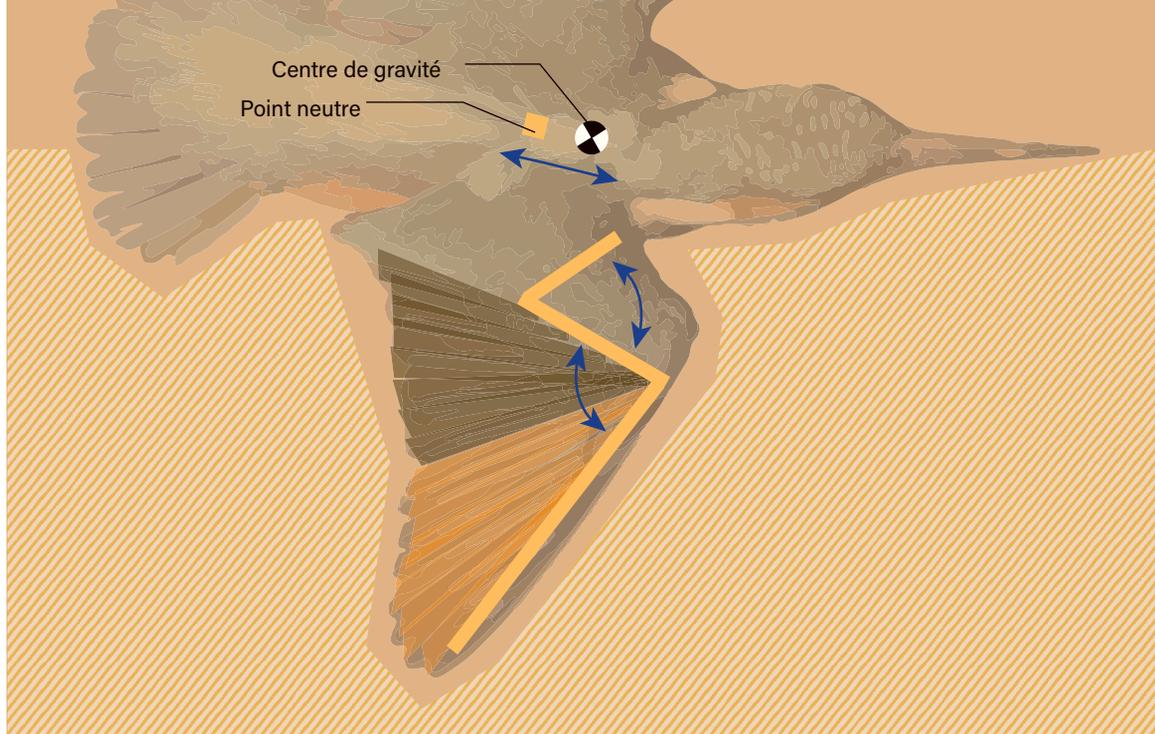
45

c

d



Le balbuzard pêcheur, *Pandion haliaetus*, fait la preuve de son habileté à manœuvrer aux différentes étapes d'une attaque en plongée. En altitude, après un bref vol stationnaire pour repérer une proie (a), il descend en piqué (b) avant de projeter ses serres vers l'avant (c) et, enfin, de remonter brusquement une fois sa proie capturée (d). Les ailes changent de forme à chaque fois pour ajuster leurs propriétés aérodynamiques.



permanence à ces mêmes perturbations. La stabilité interne est celle d'un bon avion en papier, tandis que le contrôle externe est le point fort d'un pilote aux commandes d'un avion de chasse dernier cri. Les expérimentations menées en 2001 ont mis en évidence un rôle de la stabilité interne plus important qu'on ne l'imaginait dans le vol des oiseaux.

Ainsi renseignée, Christina Harvey a axé ses travaux sur l'élaboration des premières équations dynamiques de la stabilité dans le vol des oiseaux. « Nous possédions toutes ces équations pour les avions, dit-elle. Je voulais les mêmes pour le vol des oiseaux ! »

LA GÉOMÉTRIE DU VOL

La première étape a consisté à cartographier toutes les propriétés inertielles des oiseaux, ce que les études précédentes ignoraient ou au mieux minoraient. Ces caractéristiques sont liées à la masse de l'oiseau et à la façon dont elle est répartie dans l'ensemble du corps, alors que les propriétés aérodynamiques, elles, agissent sur un oiseau en mouvement.

Les chercheurs ont donc rassemblé 36 cadavres d'oiseaux congelés, représentant 22 espèces très différentes (fournis par le Beaty Biodiversity Museum de l'université de Colombie-Britannique à Vancouver, au Canada), puis les ont disséqués jusqu'à la moindre plume. Ils ont alors mesuré la longueur, le poids et l'envergure des ailes, et les ont

Pour comprendre la capacité des oiseaux à manœuvrer, les propriétés de leurs ailes en fonction de leur forme ont été analysées. Pour ce faire, ces membres ont été décomposés en éléments géométriques simples, par exemple des segments (*en orange*).

étendus et contractés manuellement afin de déterminer l'amplitude de mouvement des coudes et des poignets des oiseaux.

À partir de ces informations, ils ont écrit un programme de modélisation qui représente les différents types d'ailes, d'os, de muscles, de peau et de plumes comme des combinaisons de centaines de formes géométriques. Le logiciel a mis en évidence des caractéristiques pertinentes comme le centre de gravité et le « point neutre », c'est-à-dire le centre aérodynamique de l'oiseau en vol (un point important de la stabilité qui tient compte du tangage et de la portance). Ils ont ensuite déterminé ces propriétés pour chaque oiseau avec différentes configurations des ailes.

Pour quantifier la stabilité et la maniabilité, ils ont calculé un facteur aérodynamique nommé « marge statique », c'est-à-dire la distance entre son centre de gravité et son point neutre par rapport aux dimensions de l'aile. Un

point neutre situé derrière le centre de gravité rend l'oiseau intrinsèquement stable: en vol, il revient naturellement à sa trajectoire initiale s'il est déséquilibré. À l'inverse, avec un point neutre à l'avant du centre de gravité, l'oiseau est instable et poussé au-delà de la position qu'il occupe au moindre écart qui est donc amplifié: c'est exactement ce qui est requis pour une manœuvre spectaculaire.

Lorsque les ingénieurs aéronautiques conçoivent des avions, ils déterminent les marges statiques correspondant aux performances souhaitées. Mais les oiseaux, contrairement aux avions, bougent leurs ailes et modifient la posture de leur corps, ce qui modifie en permanence leurs marges statiques. Les bio-ingénieurs ont donc également évalué comment la stabilité interne de chaque oiseau varie avec les configurations d'ailes.

En fait, Christina Harvey et ses collègues ont adapté aux oiseaux «ce que nous faisons pour les avions», résume Aimy Wissa, professeure adjointe d'ingénierie mécanique et aérospatiale à l'université de Princeton.

LE FAISAN, CET ÊTRE INSTABLE

Lorsque les dinosaures théropodes à plumes se sont élancés dans les airs il y a environ 160 millions d'années, ils étaient limités à des vols brefs sur de courtes distances. Mais à quelques exceptions près, les quelque 10 000 espèces d'oiseaux actuelles qui descendent de ces dinosaures sont devenues d'extraordinaires machines à voler, capables de planer gracieusement et d'enchaîner

avec des figures acrobatiques. Une telle virtuosité implique de tirer un avantage contrôlé de l'instabilité, puis de s'en dégager.

Les oiseaux modernes étant si doués pour la manœuvre, les biologistes ont supposé qu'ils avaient évolué vers de plus en plus d'instabilité. «On pensait que les oiseaux, comme les avions de chasse, exploitaient ces instabilités pour leur voltige aérienne», rappelle Christina Harvey. Mais les chercheurs ont constaté qu'une seule des espèces examinées, le faisan, est complètement instable. Quatre espèces sont totalement stables, et 17 espèces, dont les martinets et les pigeons, passent d'un vol stable à un autre instable simplement en modifiant la forme de leurs ailes.

Selon d'autres modélisations, l'évolution aurait en fait privilégié leur potentiel à alterner stabilité et instabilité. Et de fait, chez tous les oiseaux étudiés, l'équipe a prouvé que les pressions de sélection ont maintenu des marges statiques qui autorisent les deux régimes. Ainsi, la plupart des oiseaux alternent les types de vol au gré de la géométrie de leurs ailes.

Les avions modernes en sont loin, non seulement parce que leurs caractéristiques aérodynamiques et inertielles sont plus fixes, mais aussi parce qu'ils auraient besoin de deux algorithmes de contrôle très différents adaptés à chaque type de vol. En effet, à l'inverse du vol stable, le vol instable implique des corrections constantes pour éviter de s'écraser. Selon Reed Bowman, de la station biologique d'Archbold, en Floride, les oiseaux sont sans doute dotés d'un certain niveau de cognition pour y parvenir.

L'évolution aurait privilégié le potentiel des oiseaux à alterner vols stable et instable

« Les humains tentent de comprendre l'origine des oiseaux depuis l'avènement des sciences de l'évolution, et l'un des principaux obstacles a été la complexité du vol », diagnostique Matthew Carrano, de l'institut Smithsonian. Et de s'étonner. Le plus surprenant n'est pas que les oiseaux puissent passer d'un mode de vol stable à un autre instable, mais que certaines espèces, comme le faisaneau, en soient incapables. Ces espèces n'ont-elles jamais évolué en ce sens, ou bien ont-elles perdu cette capacité à un moment donné ?

VERS DE MEILLEURS AVIONS

La plupart des figures de tonneau, de vrille, de chandelle et de chute libre que les oiseaux maîtrisent ne sont pas de celles que l'on souhaite vivre lors d'un vol commercial. Mais les véhicules volants sans équipage, les drones, ont plus de liberté pour de telles manœuvres radicales, et leur popularité croissante à des fins militaires, scientifiques, récréatives... leur offre de plus en plus d'occasions de le faire.

« C'est un grand pas en avant vers la création de drones plus maniables », a déclaré Samik Bhattacharya. Aujourd'hui, la plupart des drones sont à voilure fixe, ce qui convient parfaitement aux missions de surveillance et à l'agriculture, car ils volent efficacement pendant des heures et parcourent des milliers de kilomètres. Cependant, ils n'ont pas la maniabilité des fragiles drones quadricoptères populaires auprès des amateurs. Ainsi, Floreano Dario, de l'École polytechnique

UN VOL STABLE, OU PAS

Afin d'évaluer la stabilité interne des oiseaux, les chercheurs ont déterminé la position du centre de gravité, à l'avant ou à l'arrière du point neutre, c'est-à-dire le centre aérodynamique.

Stable

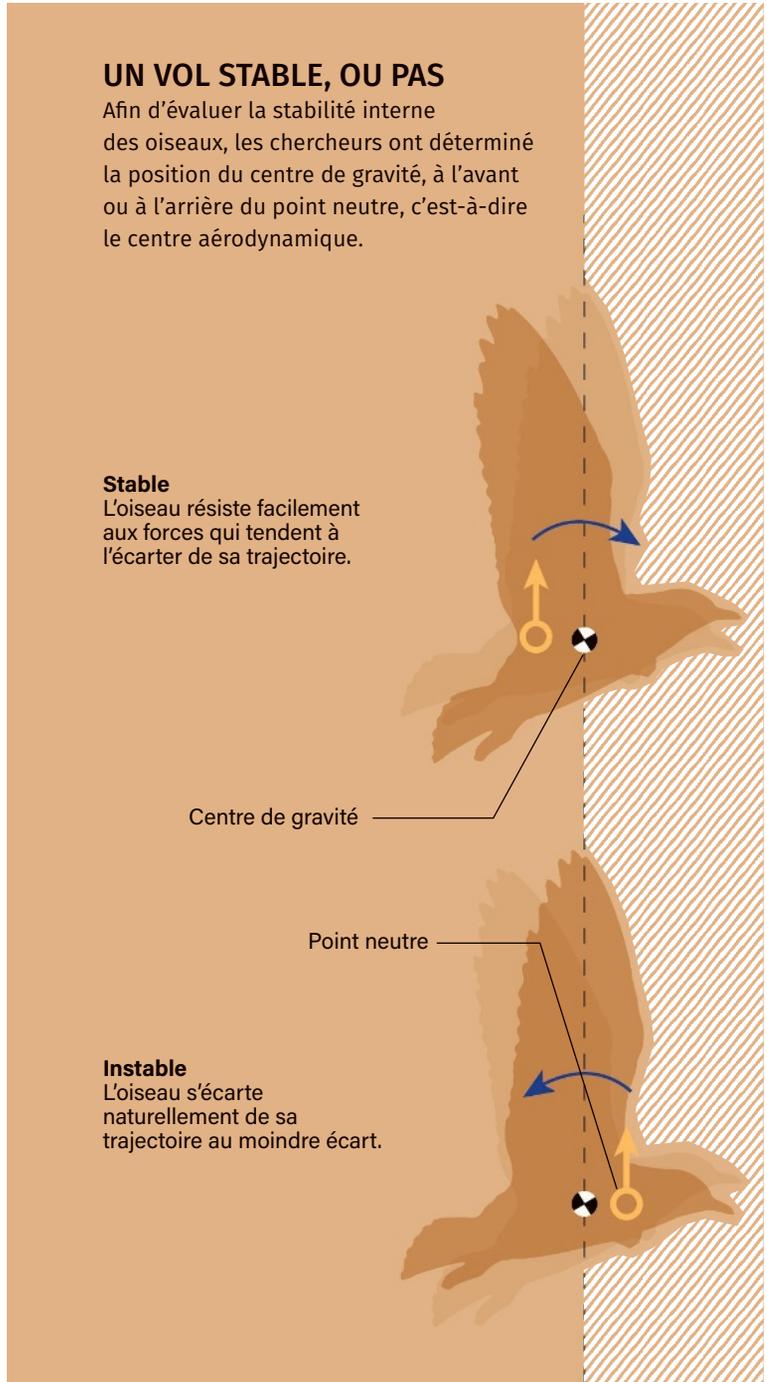
L'oiseau résiste facilement aux forces qui tendent à l'écartier de sa trajectoire.

Centre de gravité

Point neutre

Instable

L'oiseau s'écarte naturellement de sa trajectoire au moindre écart.



fédérale de Lausanne, en Suisse, et ses collègues ont-ils conçu en 2022 un drone, le *LisEagle*, directement inspiré des rapaces. L'engin, grâce à des ailes à géométrie variable, est beaucoup plus manœuvrable. En particulier, son rayon de braquage est notablement diminué. L'objectif est un dispositif capable d'évoluer dans des environnements denses, comme une forêt ou une ville.

UNE IA VOLANTE

De leur côté, des chercheurs d'Airbus et de la Nasa imaginent de nouveaux modèles d'avions inspirés eux aussi des oiseaux.

Graham Taylor et son équipe espèrent comprendre comment les oiseaux acquièrent la capacité d'effectuer des manœuvres complexes à mesure qu'ils apprennent à voler. S'ils y parviennent, on peut un jour imaginer inclure une IA dans l'élaboration des nouveaux appareils volants qui imiteraient les oiseaux non seulement dans leur apparence, mais aussi dans leurs capacités d'apprentissage.

Alors qu'elle met en place son nouveau laboratoire à l'université de Californie à Davis, Christina Harvey n'a pas encore décidé de la direction à donner à ses futurs projets. La recherche fondamentale sur le vol des oiseaux? La conception et la fabrication de drones et d'avions? Sa première tâche est de réunir des étudiants tout aussi passionnés qu'elle par ce qui se passe à la frontière de l'ingénierie et de la biologie. Encore une affaire d'équilibre entre deux régimes très différents...

— L'autrice —

> **Yasemin Saplakoglu**
est rédactrice au magazine
Quanta.

Cet article est une traduction de « Geometric analysis reveals how birds mastered flight », publié sur le site *Quanta.com* le 3 août 2022.

— À lire —

> **M. KleinHeerenbrink et al.**, Optimization of avian perching manoeuvres, *Nature*, 2022.

> **C. Harvey et al.**, Birds can transition between stable and unstable states via wing morphing, *Nature*, 2022.

> **E. Ajanic et al.**, Sharp turning maneuvers with avian-inspired wing and tail morphing, *Communications Engineering*, 2022.

> **R. Zufferey et al.**, How ornithopters can perch autonomously on a branch, *Nature Communications*, 2022.

Pourquoi migrer ? Et pourquoi vers les tropiques ? Un récent modèle apporte des réponses enfin convaincantes, puisées dans la thermodynamique.

Le moteur invisible des migrants

Jordana Cepelewicz



Partir, c'est mourir un peu...
Pas pour les oiseaux, en tout cas,
qui cherchent au contraire à assurer
au mieux leur survie en migrant.

Chaque année, c'est la même envolée. Des nuées de petits oiseaux blancs s'embarquent pour un voyage exténuant, tout en lacets, entre le Groenland et l'Antarctique... avant de revenir à leur point de départ. Au compteur, un périple de 70000 kilomètres, voire plus. Dans sa modeste vie, chaque sterne aura volé l'équivalent de trois ou quatre allers-retours vers la Lune. Dans le même temps, le tétras sombre *Dendragapus obscurus*, qui vit à la lisière de forêts d'altitude nord-américaines, se déplacera de quelques centaines de mètres pour se reproduire. Dans leur grande majorité, les autres ne migreront pas du tout : seules 15% des espèces aviaires se lancent dans ce type de grands voyages.

Malgré les disparités dans les habitudes de migration, il n'échappe à personne que toutes les régions du monde ne sont pas également attrayantes. En 1807, le naturaliste et explorateur Alexander von Humboldt écrivait déjà : « Plus nous nous approchons des tropiques, plus la variété des structures, la grâce des formes et le mélange des couleurs augmentent, comme le font aussi la jeunesse et la vigueur perpétuelle de la vie organique. » Il fut l'un des premiers d'une longue lignée de biologistes à constater que la diversité des espèces, tant végétales qu'animales (oiseaux compris), tend à croître des pôles vers l'équateur. Pourtant, au terme de deux siècles d'observations, le mécanisme à l'origine du phénomène continue d'échapper aux scientifiques.

Les hypothèses n'ont pas manqué. Certaines postulent que, comme les tropiques ont joui pendant des millénaires d'une plus grande stabilité

En bref

> Trop généraux pour être démontrables ou trop particuliers pour être extrapolables, les travaux en écologie n'expliquaient pas la cause fondamentale des migrations d'oiseaux.

> Une modélisation dite « mécaniste » fournit une réponse jugée solide : en migrant, les oiseaux maximisent leurs ressources énergétiques tout en minimisant leurs dépenses.

> Ce modèle est applicable au présent, mais aussi au passé et au futur. Au-delà des seuls oiseaux, le principe d'efficacité énergétique serait valable pour toute espèce animale sujette à migrations.

évolutive, davantage d'espèces ont eu le temps d'y prospérer, alors que les grandes glaciations ont entraîné, à proximité des pôles, l'extinction plus fréquente d'espèces régionales. D'autres affirment que les températures plus élevées à l'équateur favorisent l'émergence de davantage de niches écologiques, et donc une plus grande diversification des espèces.

Valider une idée plutôt qu'une autre, à l'échelle du monde, s'est révélé affreusement ardu. Tantôt les chercheurs ont dû cantonner leurs expériences directes à quelques espèces ou régions, tantôt ils ont cherché des corrélations à grande échelle, mais sans jamais être en mesure de prouver qu'il s'agissait de causes.

« C'EST VRAIMENT COOL ! »

Toutefois, dans une étude de 2018, un trio de chercheurs a soutenu une hypothèse très convaincante, d'après laquelle l'offre et la demande en énergie, c'est-à-dire autant celle qui est disponible dans l'environnement (sous forme de nourriture) que celle utilisée par les organismes (pour migrer, réguler leur température et se reproduire), constituent un principe écologique moteur qui façonne la structure globale de la biodiversité.

Leur nouveau modèle propose également aux scientifiques un outil puissant pour prédire comment l'activité des humains modifie rapidement cette structure. Chercheur au laboratoire d'ornithologie de l'université Cornell, Andrew Farnsworth, qui n'a pas participé à ces travaux,

Ce modèle donne un sens à une idée qui existe depuis un siècle... et il se trouve qu'il est raisonnablement simple

Andrew Farnsworth, ornithologue

estime ainsi que les trois scientifiques «ont trouvé, par leur modèle, le moyen de donner un sens à une idée qui existe depuis un siècle... et il se trouve que ce modèle est raisonnablement simple», même s'il a tout de même nécessité une masse de calculs pour être exécuté. «C'est vraiment cool!»

Selon Marius Somveille, aujourd'hui à l'University College, à Londres, qui a dirigé l'étude, la migration des oiseaux constitue une «expérience naturelle» parfaite pour tester l'hypothèse énergétique, car dans le monde entier ils adaptent leur répartition au changement des saisons. Si l'énergie est bien ce qui régit la répartition des espèces, alors on devrait le mettre en évidence chaque année au moment des migrations.

Les modélisations de ces scientifiques y parviennent très précisément. Au préalable, ils ont collecté des données observationnelles sur la répartition mondiale et les schémas de migration saisonnière des 10 000 espèces d'oiseaux de la planète: les endroits où les espèces sont particulièrement riches ou rares, par exemple, ou encore le nombre d'espèces qui se déplacent, en provenance et à destination de régions spécifiques, en hiver comme en été.

Pour comprendre le «pourquoi» de ces schémas, les chercheurs ont eu besoin d'un modèle mécaniste, c'est-à-dire inspiré d'un processus biologique identifié. Dans leur étude, ils ont créé un monde virtuel ressemblant à une version simplifiée de la Terre, avec ses continents, ses saisons et les changements de température et

de disponibilité énergétique correspondants (mesurés ou déduits d'images satellites). Ils ont ensuite ajouté une à une des espèces virtuelles, affectées notamment d'une masse et d'une aire de répartition, jusqu'à ce que ce monde finisse par manquer de ressources pour supporter d'autres ajouts.

VOLIÈRE VIRTUELLE

Principe directeur de ce monde virtuel: chaque espèce devait fonctionner de la manière la plus efficace possible sur le plan énergétique, en ne migrant que si cela lui permettait d'améliorer son «budget» énergétique. Chaque nouvelle espèce virtuelle, au moment où elle était introduite, avait le choix entre plus d'un million de scénarios aléatoires: par exemple, passer l'hiver au Brésil et l'été aux États-Unis, ou *vice-versa*, voire l'année entière au Brésil, ou aux États-Unis... et ainsi de suite pour de nombreuses régions et voies de migration potentielles autour du globe.

Sous la contrainte du modèle, chaque nouvelle espèce devait, tout en tenant compte de la localisation des espèces concurrentes, choisir le scénario qui lui offrait le plus d'énergie possible tout en minimisant les dépenses associées au métabolisme, la reproduction, la régulation thermique et le mouvement migratoire.

Puis les chercheurs ont lancé leur simulation. Comme prévu, les premières espèces ajoutées sont restées sous les tropiques toute l'année puisque les ressources y étaient abondantes et

les oiseaux n'avaient pas à consommer d'énergie pour maintenir leur température corporelle. Mais à mesure que d'autres espèces sont entrées en lice, résider sous les tropiques n'était plus l'idéal. Certaines se sont déplacées ailleurs, ou ont migré de façon saisonnière pour moins subir la concurrence.

En définitive, le monde virtuel a fini par se peupler, et la répartition finale ressemblait de près à celle des oiseaux réels connue par les données empiriques. Mieux: le modèle a su prédire le comportement migratoire avec un haut degré de précision, pointant les zones où il y a autant d'espèces qui arrivent que d'espèces qui partent – un phénomène contre-intuitif dans la nature (on s'attendrait à ce que les espèces restent sur place s'il n'y a pas de changement net), mais qui s'explique désormais par de simples considérations liées à l'énergie.

Les scientifiques admettent bien sûr que l'ajout méthodique d'espèces ne reflète pas l'histoire évolutive réelle des oiseaux. Néanmoins, si cette façon de faire, incrémentale, du modèle a produit un schéma de distribution proche de ce que l'on observe dans la nature, cela tendrait à prouver que les facteurs énergétiques sont si prégnants que, même si l'histoire des oiseaux avait été tout autre, la distribution observée serait probablement similaire.

Autre surprise: l'examen des quantités d'énergie utilisées par les espèces virtuelles pour le métabolisme, la reproduction, la régulation thermique et la migration. Dans la simulation, ces valeurs sont toutes apparues spontanément comme des solutions optimales pour l'espèce. Au vu de la littérature scientifique, elles se sont aussi révélées très proches des valeurs moyennes observées dans la nature pour ces mêmes activités.

**UN MONDE VIRTUEL RESSEMBLANT
À UNE VERSION SIMPLIFIÉE DE LA TERRE A ÉTÉ CRÉÉ,
AVEC SES CONTINENTS ET SES SAISONS.
PUIS, UNE À UNE, DES ESPÈCES VIRTUELLES ONT ÉTÉ
AJOUTÉES JUSQU'À CE QUE CE MONDE FINISSE PAR MANQUER
DE RESSOURCES POUR SUPPORTER D'AUTRES AJOUTS.**

«Ce monde virtuel simple, avec sa poignée de paramètres, parvient à reproduire fidèlement les propriétés du monde réel, se réjouit Ana Rodrigues, chercheuse à l'université de Montpellier et coautrice de l'étude. C'est un argument fort pour soutenir que les contraintes énergétiques expliquent pourquoi les oiseaux agissent comme ils le font.» Bien qu'elle n'ait pas participé à ce travail, la biologiste évolutionnaire Sonya Clegg, de l'université d'Oxford, est d'accord. Selon elle, si au lieu d'être standardisées les espèces virtuelles présentaient en plus des caractères reflétant la diversité observée chez les oiseaux, le modèle aurait expliqué la réalité d'encore plus près. «C'est toute la beauté de la chose, fait remarquer Marius Somveille. Par la simple optimisation de l'équilibre énergétique d'un oiseau moyen, on explique déjà ce qui se passe dans la nature. Pas besoin de prendre en compte les différences individuelles entre espèces pour saisir ce qui fait émerger ces schémas globaux.»

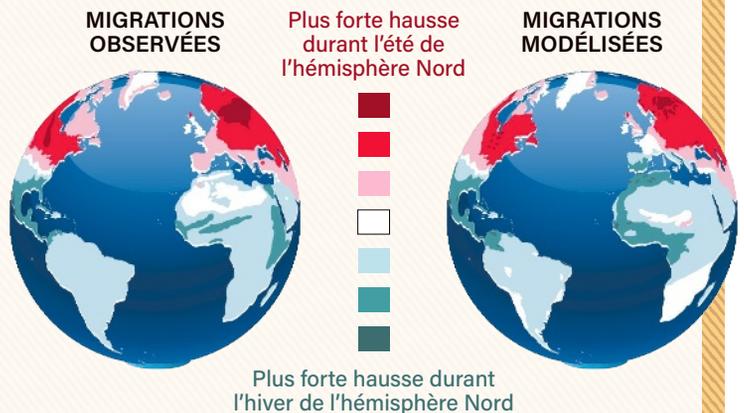
Avec cela en tête, la diversité des habitudes de migrations, qu'elle concerne les sternes ou les tétras sombres, prend davantage de sens. «De notre point de vue d'humains, cela paraît parfois irrationnel qu'un oiseau vole sur des milliers de kilomètres, note Andrew Farnsworth. Mais il s'avère qu'un pareil voyage, quoique exténuant, est avantageux du point de vue énergétique.» Les conclusions de l'étude ont même été consolidées après que l'équipe eut testé d'autres paramètres et configurations du modèle. S'il n'y a pas de recherche d'équilibre énergétique, c'est-à-dire si l'oiseau maximise seulement l'acquisition d'énergie, s'il en minimise la dépense uniquement, ou

TOP MODÈLE

Les chercheurs ont développé un monde virtuel, peuplé d'espèces d'oiseaux qui le sont tout autant, afin de tester l'hypothèse selon laquelle ces animaux migrent pour optimiser le rapport entre leurs besoins énergétiques et l'énergie qui est disponible. Résultat? Les schémas de distribution des espèces produits par le modèle sont proches de ceux observés dans la nature. En voilà deux cartographiés ci-dessous :

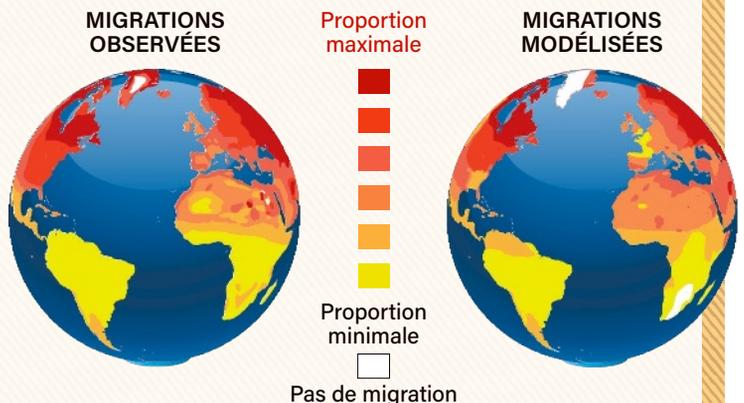
> Variation du nombre d'espèces selon les saisons

Les couleurs traduisent une hausse du nombre d'espèces due aux migrations. Dans les zones en blanc, ce nombre reste constant, ce qui n'empêche pas un renouvellement des espèces concernées.



> Proportion d'espèces migratrices selon les régions

Tant dans le modèle que dans la réalité, la part des migrateurs dans le nombre total d'espèces augmente à l'approche du pôle.



s'il ajuste les deux au hasard, alors les schémas produits par le modèle ne collent plus aussi bien à la réalité.

DES CIGOGNES CASANIÈRES

Bien entendu, tout modèle construit sur des simplifications a des limites, et celui-ci n'échappe pas à la règle. Les chercheurs ont observé que leur monde virtuel « complet » hébergeait moins d'espèces d'oiseaux que son homologue réel, et qu'il manquait de précision pour certaines régions, notamment les massifs montagneux comme les Andes ou l'Himalaya. La raison? Probablement parce que, dans ce type d'environnement, la topographie ou le taux de spéciation pèsent davantage qu'ailleurs sur la diversité d'espèces. Ce serait le signe que, si la recherche d'efficacité énergétique suffit pour comprendre la distribution des espèces, en revanche, à l'échelle locale – celle d'une région

Au bord de l'extinction en France dans les années 1970, la cigogne blanche y compte désormais 5 000 couples. Une partie d'entre eux ne migre plus vers l'Afrique pour y hiverner.



ou d'un sous-groupe d'espèces – d'autres facteurs sont plus importants.

Par ailleurs, même si le modèle suggère que l'évolution a poussé les oiseaux aux choix énergétiques les plus efficaces, il ne donne aucun détail sur la manière dont ils y sont parvenus, que ce soit à l'échelle globale ou régionale. Cela mis à part, les chercheurs ont bien l'intention de mettre à profit leur modèle pour explorer les effets de l'action humaine sur la vie sauvage. Changement climatique, systèmes agricoles, villes plus ou moins grandes... *Homo sapiens* affecte la planète dans les grandes largeurs. Au point que des signes de changement chez les migrateurs sont déjà perceptibles. Rien qu'en Europe, par exemple, la cigogne blanche *Ciconia ciconia* a cessé de migrer aussi loin qu'au paravant puisque les températures hivernales sont plus clémentes et que nos ordures, mises en décharges, lui offre une pitance à l'année.

L'ALBATROS ET LA TORTUE

Puisque ce nouveau modèle est applicable aussi bien au passé qu'au futur, Marius Somveille ne s'en est pas privé. Concernant les migrations d'oiseaux sur les 50 000 dernières années, l'outil indique que, globalement, elles ont été presque aussi intenses qu'aujourd'hui durant le dernier âge glaciaire, voire davantage dans les Amériques. Envisager l'avenir est un chantier plus vaste, et l'écologue s'est par exemple penché sur la façon dont les populations d'albatros qui se reproduisent dans l'océan Indien méridional modifieraient leurs comportements de migrations sous l'effet du changement climatique.

Au-delà des seuls oiseaux, les mammifères marins, les poissons, les insectes et bien d'autres

groupes d'animaux sont susceptibles de passer à la moulinette du modèle. « Toute créature mobile connaît un certain niveau de migration, résume Ana Rodrigues. Notre opinion est que les mêmes principes – besoin de répondre à la saisonnalité, à l'énergie en excès ou en carence – conduisent les organismes aux déplacements qui sont les leurs. » Marius Somveille a ainsi appliqué son modèle à une population de tortues des Galápagos pour tester la manière dont ces animaux, par leurs excréments, disséminent les graines de goyaves dans l'archipel.

Le scientifique aimerait aussi utiliser le modèle à plus petite échelle pour tester sa capacité à expliquer la redistribution des individus au sein d'une espèce. « Notre compréhension est à l'échelle globale, reconnaît-il, et à ce niveau-là il est difficile de concevoir des actions de conservation. » Les résultats obtenus seraient alors précieux pour étayer des prévisions et aider à la protection des espèces. Car si aucune menace ne pèse sur cette grande voyageuse qu'est la sterne arctique, plus d'une espèce d'oiseaux sur huit est menacée de disparaître.

— L'autrice —

> **Jordana Cepelewicz**

est journaliste au magazine *Quanta* où elle traite les sujets relatifs aux mathématiques.

Cet article est la traduction actualisée de « A Thermodynamic Answer to Why Birds Migrate », mis en ligne sur Quantamagazine.org le 7 mai 2018.

— À lire —

> **L. Moisan et al.**, *Scaling*

migrations to communities: An empirical case of migration network in the Arctic, *Frontiers in Ecology and Evolution*, 2023.

> **F. La Sorte et al.**, Seasonal species richness of birds on the world's islands and its geographical correlates, *Proc. R. Soc. B*, 2022.

> **M. Somveille et al.**, Projected migrations of southern Indian Ocean albatrosses as a response to climate change, *Ecography*, 2020.

> **M. Somveille et al.**, Simulation-based reconstruction of global bird migration over the past 50,000 years, *Nature Communications*, 2020.

Les oiseaux migrateurs s'orientent grâce au champ magnétique terrestre. La clé de cette remarquable sensibilité? Un effet quantique !

58

Des navigateurs à boussole quantique

Peter Hore et Henrick Mouritsen



Le rouge-gorge familier *Erithacus rubecula*, migrateur partiel, commun en Europe, s'oriente d'après le champ magnétique terrestre.

En bref

> Certains oiseaux migrateurs parcourent des milliers de kilomètres et retrouvent leur lieu d'hivernage ou de reproduction avec une précision de quelques centimètres.

> Ils héritent de leurs parents une direction d'envol privilégiée, utilisent le Soleil et les étoiles pour se construire une carte mentale en vol, et sont sensibles à la direction du champ magnétique terrestre.

> Leur cerveau encoderait cette direction grâce aux oscillations entre deux états quantiques de fragments de molécules – les cryptochromes – présentes dans leurs yeux.

60

Souvenez-vous l'hiver dernier. Les jours raccourcissaient, le froid s'installait... et vous aviez une envie de Soleil. La prochaine fois, faites comme la barge rousse, cet échassier qui, l'hiver venu, quitte l'Alaska vers la Nouvelle-Zélande! Un vol de sept jours sans escale à travers l'océan Pacifique pour rejoindre une île située à 12000 kilomètres. Chaque année, des dizaines de milliers de barges rousses réussissent cet exploit vital. Elles ne sont pas les seules. Des milliards d'autres oiseaux entreprennent de telles expéditions au long cours.

Pour expliquer la disparition saisonnière de nombre d'entre eux, Aristote imaginait que les hirondelles hivernaient, tandis que d'autres espèces se transformaient, les rossignols en rouges-gorges, par exemple. Seuls l'avènement du baguage au siècle dernier, puis du suivi par satellite de ces volatiles, et l'essor des campagnes de terrain ont élucidé le mystère. On s'est alors rendu compte des immenses distances parcourues par certains oiseaux. Et les chercheurs de constater que ceux qui étaient nés dans l'année, migrant pour la première fois, savaient où aller. Tout aussi étonnant, ils empruntent les mêmes itinéraires encore et encore, année après année, génération après génération. Comment font-ils?

Comme les marins d'antan utilisaient le Soleil et les étoiles pour se guider, les oiseaux migrateurs s'orientent d'après des repères célestes. Cependant, ils disposent d'un autre moyen, la perception du champ magnétique de la Terre. Si plusieurs ressorts de cette «magnétoception

aviaire» sont encore inconnus, nous pensons toutefois avoir réussi une percée vers la résolution de cette énigme: selon nous, la magnétoception s'appuierait sur de subtils effets quantiques se produisant dans les yeux de l'oiseau, le rendant capable de «voir» les lignes du champ magnétique terrestre!

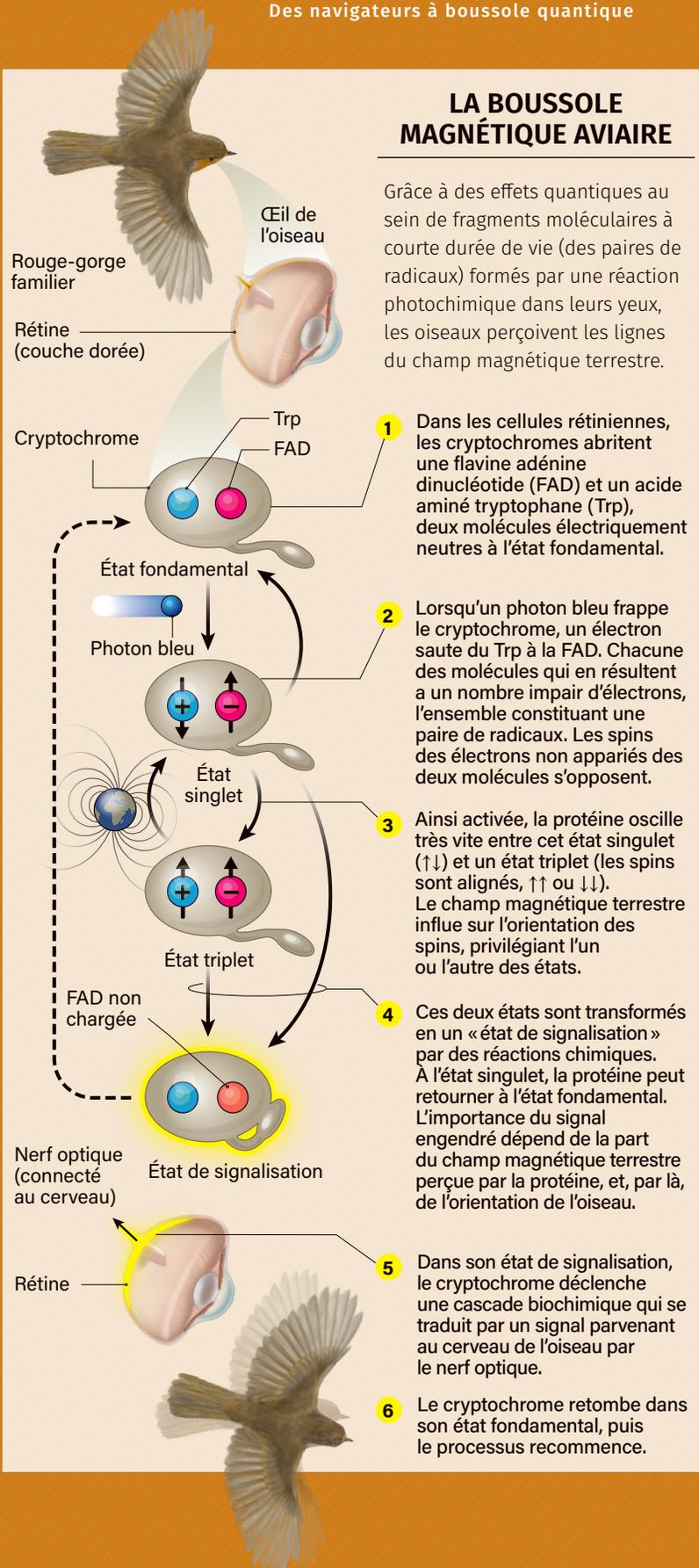
UN SENS MYSTÉRIeux

Un oiseau migrateur dispose d'une horloge interne, qui, entre autres, lui indique quand migrer. Il «hérite» aussi de ses parents une direction d'envol. En effet, chacun de ses géniteurs en possède une, encodée génétiquement, qui lui est propre. La direction d'envol du rejeton est une moyenne: un oiseau né d'un père «sud-ouest» et d'une mère «sud-est» se dirigera, le moment venu, vers le sud. Mais comment repérer le sud-ouest, le sud ou le sud-est?! Ils disposent pour cela d'au moins trois boussoles: la première est liée à la position du Soleil, la deuxième dépend des constellations, et la troisième exploite le champ magnétique terrestre.

Au moment de leur première migration, les jeunes oiseaux suivent les instructions encodées dans leurs gènes, du type: «Vole trois semaines vers le sud-ouest, puis deux semaines vers le sud-sud-est.» Cependant, ils ne peuvent corriger leur course, car ils sont encore dépourvus de carte mentale de navigation. Ils ne l'établiront qu'avec les informations tirées de leur première migration. Une fois acquise, ils atteindront leurs objectifs lors des voyages suivants avec une précision

LA BOUSSELE MAGNÉTIQUE AVIAIRE

Grâce à des effets quantiques au sein de fragments moléculaires à courte durée de vie (des paires de radicaux) formés par une réaction photochimique dans leurs yeux, les oiseaux perçoivent les lignes du champ magnétique terrestre.



de quelques centimètres! En effet, année après année, certains oiseaux se reproduisent dans le même nid et dorment sur le même perchoir dans leur aire d'hivernage.

Les capacités de navigation des oiseaux migrateurs résultent de plusieurs sens à la fois: la vue, l'odorat et la magnétoception. S'agissant des deux premiers (voir *L'épineuse question du flair des oiseaux*, par B. Grison, page 100), les chercheurs en savent déjà beaucoup sur les mécanismes biophysiques à l'œuvre. En revanche, leur boussole magnétique est difficile à comprendre.

L'observation d'oiseaux en cage, exposés à des champs magnétiques contrôlés, a montré qu'ils sont capables non seulement de détecter l'axe du champ magnétique (comme l'aiguille d'une boussole), mais aussi de mesurer son angle avec la surface de la Terre. Une inversion du champ magnétique n'a aucun effet sur l'orientation de l'oiseau, tandis que la magnétoception aviaire est perturbée par l'ajout de champs magnétiques extrêmement ténus, mais s'inversant plusieurs millions de fois par seconde. Enfin, même si les oiseaux volent la nuit sous les étoiles, leur boussole magnétique dépend manifestement de la lumière, ce qui suggère un lien entre vision et magnétoception.

En 1978, Klaus Schulten, à l'institut Max-Planck de chimie biophysique, à Göttingen, a concilié ces différentes caractéristiques en une idée remarquable: la magnétoception aviaire résulterait de transformations chimiques sensibles au magnétisme. À première vue, c'est

physiquement absurde, car l'énergie susceptible d'être extraite du champ magnétique terrestre semble des millions de fois trop faible pour briser ou même affaiblir significativement les liaisons atomiques au sein des molécules. Cependant, cette hypothèse s'appuyait sur un phénomène découvert dix ans auparavant: la cinétique de certaines réactions chimiques pendant lesquelles se forment des intermédiaires réactionnels, comme les paires de radicaux, est affectée même par de très faibles champs magnétiques. Rappelons que, parce qu'ils ont un ou plusieurs électrons non appariés sur leur couche externe, les radicaux sont très instables, donc extrêmement réactifs, même sous une infime influence.

LE SPIN DES OISEAUX

Comprendre les propriétés si particulières des paires de radicaux oblige à parler du spin électronique, en d'autres termes du moment cinétique intrinsèque de l'électron, qui est une propriété éminemment quantique. Le spin est représenté par un vecteur doté d'une direction, notée par des flèches \uparrow ou \downarrow , et d'une intensité que traduit un nombre quantique, le «nombre quantique de spin» ou «spin». Les particules dotées d'un spin ont aussi un moment magnétique intrinsèque. Or le moment magnétique d'un système doté de charges en mouvement est proportionnel au moment cinétique, à un facteur dit «gyromagnétique» près. Cette propriété s'étend à l'électron, dont le moment magnétique est proportionnel au spin, c'est-à-dire à son moment cinétique intrinsèque. Conséquence: comme toute particule

dotée d'un spin, l'électron se comporte comme un petit aimant, qu'un couple de forces ramène dans le sens des lignes du champ magnétique dès que l'axe de ses pôles s'en écarte.

Les molécules ayant un nombre pair d'électrons aux spins opposés ont un spin total nul. Les radicaux, en revanche, ont un électron non apparié isolé, donc un spin non nul et, par conséquent, un moment magnétique non nul. Lorsqu'une paire de radicaux est créée, c'est-à-dire lorsque deux radicaux sont produits simultanément par une réaction chimique, les spins des électrons non appariés de chaque radical peuvent s'opposer ($\uparrow\downarrow$) ou s'ajouter ($\uparrow\uparrow$ ou $\downarrow\downarrow$), ce que l'on désigne respectivement par les termes d'«état singulet» et d'«état triplet».

Immédiatement après la création d'une paire de radicaux dans un état singulet, leurs champs magnétiques internes entraînent les deux spins électroniques dans une sorte de «valse quantique», plusieurs secondes durant, pendant laquelle la paire alterne entre état singulet et état triplet plusieurs millions de fois par seconde. Quand les conditions le favorisent, un champ magnétique externe est capable d'influer sur cette «valse». Selon Klaus Schulten, ce subtil effet quantique rend possible une magnétoception sensible à un stimulus 1 million de fois plus faible que ce que l'on estimait possible. Nos recherches, et d'autres, ont livré des indices en faveur de cette hypothèse.

Deux aspects du mécanisme de magnétoception de Klaus Schulten expliquent des propriétés connues de la boussole magnétique aviaire: d'abord, qu'elle soit insensible aux inversions du

La navigation
mobilise la vue,
l'odorat et
la magnétoception



La barge rousse (*Limosa lapponica*) est un petit échassier proche de la bécassine. Ce migrateur peut franchir en vol jusqu'à 12 000 kilomètres sans escale, volant à une vitesse atteignant 90 kilomètres par heure. Selon la longitude de sa zone de nidification dans le Nord, elle effectue de grands voyages en vol battu vers les rivages africains, asiatiques ou océaniques.

champ magnétique externe, puisque les paires de radicaux le sont aussi; ensuite, le rôle joué par la lumière dans son fonctionnement. En effet, des paires de radicaux se forment souvent lorsque certaines molécules absorbent des photons. La boussole magnétique aviaire dépendant de la lumière, les yeux joueraient un rôle.

UN MÉCANISME POSSIBLE

Il y a environ une dizaine d'années, à l'université d'Oldenburg, l'équipe de l'un de nous (Henrik Mouritsen) a découvert que le cluster N, une région du cerveau impliquée dans le traitement des informations visuelles, est de loin la zone cérébrale qui s'active le plus pendant que certains oiseaux migrateurs nocturnes utilisent leur boussole magnétique. Des expériences ont ensuite montré que des rouges-gorges migrateurs dont le cluster N dysfonctionne sont incapables de s'orienter d'après le champ magnétique terrestre. Pas de doute, les capteurs magnétiques se trouvent dans la rétine, soumis à l'influence d'une certaine lumière.

Des collègues ont montré que la fréquence de cette lumière doit se situer dans la bande bleue du spectre. En 2000, Klaus Schulten a suggéré que le siège de la photochimie nécessaire serait une protéine tout juste découverte: le cryptochrome.

De tels cryptochromes existent chez les plantes, les insectes, les poissons, les oiseaux, les humains... et ont diverses fonctions, par exemple dans la régulation des horloges circadiennes ou, dans le cas des plantes, dans le contrôle de la croissance. Chez les vertébrés, les cryptochromes sont les seuls photorécepteurs connus formant des paires de radicaux lorsqu'ils absorbent de la lumière bleue, et on en a découvert six types dans les yeux des oiseaux migrateurs.

Au cœur de nombreux cryptochromes se niche une flavine adénine dinucléotide (FAD), une molécule non protéique (on parle de «coenzyme») qui, contrairement au reste de la structure du cryptochrome, absorbe la lumière bleue. Parmi les quelque 500 acides aminés composant un cryptochrome typique, une chaîne (à peu près) linéaire constituée de trois ou quatre tryptophanes (un acide aminé) s'étend de la FAD jusqu'à la surface de la protéine. Or, dès que la FAD absorbe un photon bleu, un électron du tryptophane qui lui est attaché saute sur la partie flavine de la FAD, puis, pour retrouver sa neutralité, attire à lui un électron du deuxième tryptophane, et ainsi de suite. Résultat: un radical FAD chargé négativement est relié à un radical tryptophane chargé positivement situé à la surface de la protéine.

En 2012, avec des collègues de l'université d'Oxford, l'un de nous (Peter Hore) a testé les

La pollution électromagnétique interfère avec la boussole des oiseaux

performances du cryptochrome comme capteur magnétique. Son équipe a choisi de tester le cryptochrome-1, une protéine issue de l'arabette des dames (*Arabidopsis thaliana*), une plante modèle. Grâce à de brèves impulsions laser produisant des paires de radicaux à l'intérieur des protéines purifiées, ils ont découvert que l'on peut régler finement leurs réactions à l'aide de champs magnétiques. C'était encourageant, sauf que les plantes ne volent ni ne migrent...

DES PLANTES AUX OISEAUX

Dix ans plus tard, nous parvenions à faire de même avec un cryptochrome d'oiseau migrateur. Nous avons opté pour le cryptochrome-4a (Cry4a), en partie parce que la FAD y est fortement liée. En outre, des recherches avaient montré que, chez les oiseaux migrateurs, les quantités de Cry4a sont plus élevées lors des migrations qu'à d'autres moments de l'année. Les simulations informatiques d'Ilia Solov'yov ont révélé que le Cry4a du rouge-gorge renferme une chaîne de quatre tryptophanes, soit un de plus que le Cry1 de l'arabette. Cette chaîne linéaire allongée avait-elle évolué pour rendre plus performante la magnétoception aviaire?

Après avoir relevé, grâce à Jingjing Xu, une doctorante du laboratoire de Henrik Mouritsen, le défi d'obtenir de grandes quantités de Cry4a de rouge-gorge très pur, nous en avons envoyé des échantillons à Oxford, où Christiane Timmel et Stuart Mackenzie les ont étudiés en détail. Leur groupe a ainsi découvert qu'en bout de chaîne les troisième et quatrième radicaux tryptophanes sont sensibles au champ magnétique

lorsqu'ils sont reliés au radical FAD. Nous pensons donc que les tryptophanes concourent pour détecter le champ magnétique, pour mesurer sa direction puis pour le signaler biochimiquement. Le quatrième tryptophane améliorerait les étapes initiales de la transduction du signal, le processus par lequel les impulsions nerveuses codant la direction du champ magnétique sont engendrées puis envoyées par le nerf optique au cerveau.

Ces expériences suffisent-elles à expliquer la magnétoception aviaire? Loin de là! La prochaine étape, cruciale, consistera à déterminer si des paires de radicaux se forment vraiment dans les yeux des oiseaux migrateurs. Pour y parvenir, la méthode la plus prometteuse procède de travaux ayant montré dans les années 1980 que les champs magnétiques fluctuants modifient la façon dont les paires de radicaux réagissent à la présence d'un champ magnétique statique. En d'autres termes, une faible onde radio fluctuant au rythme de la «valse des singulet-triplet» pourrait perturber la boussole magnétique des oiseaux. En 2004, Thorsten Ritz et ses collègues de l'université de Californie à Irvine ont confirmé cette idée.

En 2007, des expériences comportementales similaires de Henrik Mouritsen ont différé sur un point: l'étendue du spectre électromagnétique perturbateur. Au printemps et à l'automne, les oiseaux s'appêtant à migrer semblent impatients de reprendre leur route, comportement qui a reçu le nom allemand de *Zugunruhe* (littéralement «intranquillité migratoire»). Dans une cage, ces oiseaux s'orientent instinctivement dans la direction vers laquelle ils voleraient à l'état sauvage, mais pas ceux enfermés dans des

cabanes en bois du campus... En fait, le faible bruit radio associé à la pollution électromagnétique des équipements électriques des laboratoires voisins interférerait avec la boussole magnétique des oiseaux.

VERS DES PREUVES IN VIVO

Ces résultats sont significatifs à plusieurs égards. Si les radiofréquences affectent le capteur magnétique et non, par exemple, un composant de la voie de signalisation en aval, alors cela prouvera de façon irréfutable qu'une paire de radicaux joue un rôle central dans la boussole magnétique aviaire. En outre, les ondes électromagnétiques radio perturbant l'orientation magnétique des oiseaux sont si faibles que nous ne comprenons pas encore bien comment elles peuvent perturber les informations directionnelles tirées du champ magnétique terrestre, bien plus puissant. Nous devons creuser la question.

Il est aussi remarquable que les oiseaux du laboratoire d'Oldenburg soient davantage désorientés par un bruit électromagnétique dans le spectre radio, c'est-à-dire par des champs magnétiques fluctuant aléatoirement au sein d'un spectre de fréquences, que par les champs à fréquence fixe employés par Thorsten Ritz et ses collaborateurs. Encore un mystère à éclaircir.

Bien d'autres questions restent toujours sans réponse. Pour commencer, nous devrions nous assurer que les effets du champ magnétique sur le Cry4a du rouge-gorge observés *in vitro* existent aussi *in vivo*. Nous aimerions aussi savoir si les oiseaux migrateurs dont on a génétiquement

empêché la production de Cry4a parviennent tout de même à s'orienter à l'aide de leur boussole magnétique. Si nous prouvions qu'une paire de radicaux est à l'origine de la magnétoception *in vivo*, nous aurions démontré qu'un système sensoriel biologique peut réagir à des stimuli plusieurs millions de fois plus faibles que ce qu'on envisageait.

Plus largement, comprendre pleinement les systèmes de navigation internes des migrateurs aiderait à les protéger des effets néfastes de la destruction des habitats et du changement climatique, par exemple en amenant les oiseaux à nidifier ou à hiverner en des lieux sûrs.

La prochaine fois qu'une envie hivernale de soleil vous prendra, souvenez-vous du rôle crucial de la physique des spins dans les voyages de plusieurs milliers de kilomètres qu'entreprennent les petits volatiles pour assouvir ce même besoin. L'émerveillement qui s'ensuivra adoucira les rigueurs du froid.

— Les auteurs —

> **Peter Hore** est chimiste à l'université d'Oxford, au Royaume-Uni.

> **Henrik Mouritsen** est biologiste à l'université d'Oldenburg, en Allemagne.

— À lire —

> **J. Xu et al.**, Magnetic sensitivity of cryptochrome 4 from a migratory songbird, *Nature*, 2021.

> **H. Wu et al.**, Protein-protein interaction of the putative magnetoreceptor cryptochrome 4 expressed in the avian retina, *Scientific Reports*, 2020.

> **S. Engels et al.**, Anthropogenic electromagnetic noise disrupts magnetic compass orientation in a migratory bird, *Nature*, 2014.

Drôles d'oiseaux

S'il fallait ouvrir un cabinet de curiosités aviaire, qu'y mettriez-vous ? Voici le choix (subjectif) de « Pour la science ».

Olivier Voizeux

Hoazin Le bœuf à plumes

De l'hoazin huppé, on peut dire qu'il est unique en son genre... au sens le plus strict, puisque sa famille, celle des *Opisthocomidae*, ne compte qu'un genre et une espèce. Pour le croiser, il faut s'aventurer dans les mangroves de l'Amazonie ou de l'Orénoque. Pur herbivore, il arrache de son bec les feuilles d'une cinquantaine d'espèces végétales qu'il enfourne dans un volumineux jabot si rempli de nourriture que l'animal doit l'appuyer sur une branche pour ne pas perdre l'équilibre. Il serait bien en peine de digérer cette pitance sans l'aide de précieuses bactéries, qui le rapprochent... des ruminants. À ceci près qu'il n'est pas doté d'un estomac spécialisé. La fermentation dégageant une odeur assez pestilentielle, elle lui vaut le dédain des chasseurs, peu empressés de le mettre à rôti.



Ce n'est pas un dragonneau de *Game of Thrones*, mais un bébé hoazin. Il éclôt avec deux griffes sur chaque aile, qu'il utilise pour se déplacer sur les branches sans tomber dans l'eau. En général, elles disparaissent dans les premiers mois.



Rôle de cuvier Deux raisons de râler

L'histoire va-t-elle bégayer pour ce volatile des Seychelles? Son ancêtre vivait au Pleistocène sur l'atoll d'Aldabra; la découverte de fossiles ne laisse aucun doute sur le fait qu'il était dépourvu d'ailes, une évolution non rare chez les volatiles insulaires. Mais la montée des eaux, peut-être à plusieurs reprises, il y a 200 000 à 340 000 ans, a noyé toute la faune terrestre. Après que l'atoll a réémergé, il a de nouveau été colonisé, sans doute à partir de Madagascar, par des râles de Cuvier ayant conservé la capacité de voler... lesquels ont, depuis, de nouveau perdu leurs ailes! La montée de l'océan Indien que cause le réchauffement climatique d'origine anthropique risque de lui porter un second coup fatal.



68



Aigrette ardoisée La pêche au parasol

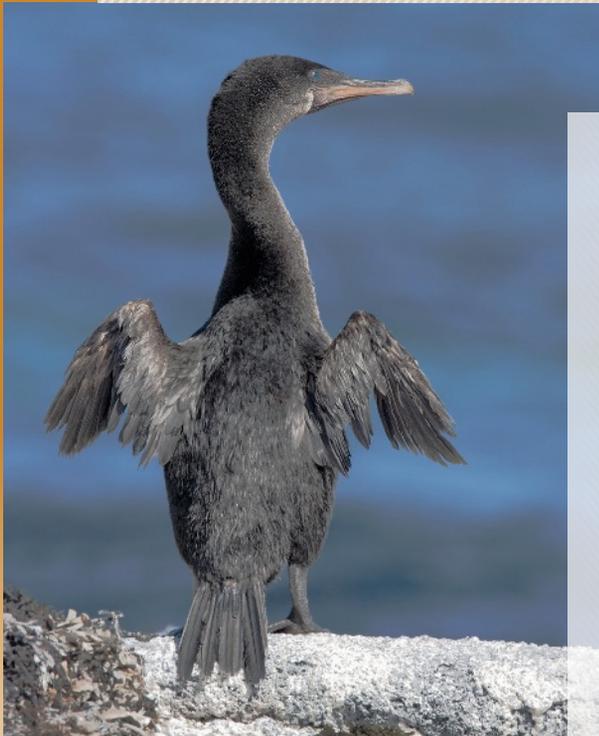
Les poissons n'aiment guère la lumière qui les expose à la vue des prédateurs. Alors quand on leur offre un peu d'obscurité, ils prennent confiance. Telle est la ruse de l'aigrette ardoisée: dos au soleil, joignant ses ailes au-dessus de sa tête, elle projette de l'ombre sur les eaux douces ou saumâtres peu profondes d'Afrique. Et engloutit les dupes. La Fontaine aurait adoré.

Paradisier superbe Le masque et la plume

Dans ce paradis qu'est la Nouvelle-Guinée, ce polygame déploie, au moment de la parade nuptiale, un large plastron de plumes iridescentes vertes. Les deux points verts ne sont pas ses yeux, mais d'autres plumes comparables aux précédentes. L'éventail noir, une large cape de plumes, fixée sur le haut du dos et totalement érectile: ici, elle est donc dressée. Avouons-le, difficile de reconnaître un oiseau...



69



Cormoran aptère Trop moignon!

Sur la quarantaine d'espèces de cormorans, seule celle-ci, endémique des Galâpagos, est clouée au sol. Ses ailes de nabot (de deux tiers plus courtes que celles des autres espèces) l'empêchent de voler. Habile plongeur, il se propulse à l'aide des pattes, et non de ses moignons. Alors, quel avantage apportent ces ailes miniatures? En son temps, la question a servi à contester la théorie de l'évolution – depuis, on sait que l'espèce aurait perdu cette aptitude, inutile sur une île dénuée de prédateurs, il y a 2 millions d'années. Lors de son séjour dans l'archipel au XIX^e siècle, il semble bien que Darwin soit passé à côté de cette bestiole... à la différence du naturaliste du film *Master and Commander!*

Jardinier satiné La drague en bleu



Architecte, peintre, chanteur, danseur... Quand il s'agit de plaire, ce passereau des forêts australiennes est artiste multicarte. Avec patience, il construit au sol un berceau, composé d'une haie de brindilles, qu'il peint avec un mélange de baies et de salive. En parterre, il éparpille des objets d'une ahurissante variété : fleurs, plumes, ailes d'insectes, mais aussi bouchons en plastique ou Lego... Leur point commun ? Ils sont bleus – du moins pour les mâles adultes. Ce choix de couleur mettrait en valeur leur plumage lors des parades.

70

Tisserins Des nids haute couture

Dans la famille tisserin, il y a du monde : au moins 64 espèces répertoriées. Distribuées entre l'Afrique et l'Asie, toutes ont la capacité, grâce à leur bec très agile, de tisser un nid complexe. Écrire que ces oiseaux « tissent » n'est pas exagéré, car les tiges de graminées sont soigneusement entremêlées, ce qui donne au nid légèreté et solidité. Chez le tisserin intermédiaire (*photo*), le nid prend l'allure d'une cruche, et il arrive que l'entrée, située dessous, se prolonge par un « tube ». Le mâle en est l'artisan principal, la femelle se chargeant ensuite de tapisser l'intérieur.



De haut en bas : © Konrad Wothé et Jim Brandenburg/Winden Pictures/Biosphoto



Républicain social Logement collectif de père en fils

Ce malheureux poteau électrique n'a pas supporté la charge d'une HLM pour oiseaux. Car l'énorme protubérance qui l'a fait céder n'est autre qu'un nid collectif de républicains sociaux. Membres de la vaste famille des tisserins, ces oiseaux utilisent les points hauts des zones arides du sud de l'Afrique pour établir leurs colonies; le plus souvent, il s'agit d'un acacia, mais certaines constructions humaines font aussi l'affaire. C'est qu'un nid de républicains sociaux, taillé pour héberger une centaine de couples, voire davantage, mesure 5 à 6 mètres de long pour 3 à 4 mètres de large, pour une épaisseur de 1 à 2 mètres. Sa masse peut dépasser la tonne – ce que les planteurs de poteaux n'avaient pas anticipé. Un tel nid est l'œuvre de plusieurs générations de tisserins, et il est bâti pour durer des décennies! Malgré les apparences, il n'est pas fait de terre battue, mais d'une colossale accumulation de tiges et de brindilles. La qualité de l'isolation protège bien les locataires des chaleurs diurnes comme des froidures de l'hiver dans le désert du Kalahari.



Torcol Fourmilier, avec deux ailes

Répandu dans les régions tempérées d'Europe et d'Asie, le torcol enroule sous son bec pointu une langue collante de plusieurs centimètres, qu'il déploie pour engluer les fourmis noires, son dîner favori.

72



Ibijau gris : l'œil jaune d'œuf

Les taches et les striures de son plumage gris à brun font de ce grand oiseau sud-américain, lorsqu'il se tient raide comme un piquet, un maître en camouflage. À condition qu'il ferme les paupières, car ses yeux jaune pétard, eux, ont tout pour attirer l'attention. Sauf que... sur cette photo la pupille est très contractée à cause du flash. La nuit, lorsqu'il part en quête d'insectes volants, elle est plutôt démesurément dilatée, et seule une fine couronne jaune est visible.

Grand géococou « Bip Bip », c'est lui!

Notre titre est un indice: nommé *roadrunner* en anglais, le grand géococou n'est autre que le « Bip Bip » de la Warner Bros, qui refuse obstinément de passer à la casserole du coyote. En réalité, ce serait plutôt lui, la terreur. Oiseau de grande taille (50 à 60 centimètres), rapide à la course (30 kilomètres par heure, plus vite que vous et moi), il n'a pas son pareil pour se ruer sur un rongeur ou un serpent (ici, un crotale diamantin), s'en saisir et le fracasser contre la pierraille des déserts nord-américains. Avec 80 kilogrammes de plus, il ne ferait pas bon le croiser dans la nature...



Bec-en-sabot Pas une gueule de porte-bonheur

Quand on ne l'appelle pas « bec-en-sabot », on lui donne du « cigogne à tête de baleine ». Certains faciès sont ingrats... Mais il ne faudrait pas trop le lui dire en face, car ce bec a tout d'une arme de guerre: un crochet acéré le prolonge et ses mandibules sont garnies de bords tranchants qui décapitent les poissons en moins de temps qu'il n'en faut pour le dire. La disposition de ses yeux sur la face lui permet d'avoir une vision binoculaire qui ne laisse guère de chances à ses proies des marais de l'Est africain.



Petits cerveaux, grands esprits

« Être comme une poule qui aurait trouvé un couteau » : y a-t-il expression plus insultante pour dénigrer les capacités cognitives des oiseaux ? Pourtant, des corvidés ont recours à des outils, et pas seulement en laboratoire. Côté conscience de soi, et même s'il n'est pas considéré comme imparable, le test du miroir a été passé avec succès par la pie, capable de lire son reflet comme l'expression d'elle-même, à égalité avec ces « références » que sont le chimpanzé ou le dauphin. Quant au langage, il faut avouer que les perroquets capables de communiquer avec nous dans une langue humaine sont plus nombreux que les humains aptes à se faire comprendre en mode cacatoès ou gris du Gabon. « Cerveille d'oiseau » a désormais tout d'un compliment.



03

Pour se réchauffer, les manchots empereurs se serrent les uns contre les autres. S'ensuit alors une « danse géométrique » qui a tout d'un algorithme d'optimisation du groupe et du partage de chaleur.

Pas manchots en maths

Susan D'Agostino

Les manchots empereurs se regroupent pour se réchauffer avec une rigueur toute mathématique.



Nombre d'espèces animales ont évolué pour se protéger du froid, et les solutions sélectionnées sont diverses: les bisons se rassemblent près des sources géothermiques, les baleines sont dotées d'une couche de graisse isolante, les ours noirs s'abritent dans des grottes... Et confrontés aux températures particulièrement basses et les vents violents de l'Antarctique, les manchots empereurs se serrent les uns contre les autres. Mais pas n'importe comment.

«Un regroupement de manchots ressemble à un chaos organisé, explique François Blanchette, de l'université de Californie à Merced. Chaque oiseau agit individuellement, mais le résultat final est une distribution équitable de la chaleur pour l'ensemble de la communauté.» Le mathématicien et ses collègues ont de fait découvert que les manchots s'organisent de façon mathématiquement très efficace pour lutter contre les rigueurs de l'hiver austral.

Plus récemment, Daniel Zitterbart, de l'Institut océanographique de Woods Hole, aux États-Unis, a conçu et déployé avec son groupe des caméras à haute résolution, cachées dans de faux blocs de glace, afin d'étudier les comportements collectifs des volatiles sans les perturber. Ils ont ainsi mis en évidence les conditions qui poussent les manchots à se blottir les uns contre les autres et étudient le rôle de ce comportement sur la santé de la colonie au fil du temps.

Au bout du monde, des centaines de milliers de manchots empereurs sortent de la mer chaque année en avril pour parcourir plus de 80 kilomètres jusqu'à leurs colonies à l'intérieur des

En bref

> Lorsque la température baisse, les manchots empereurs se blottissent les uns contre les autres de façon à se réchauffer.

> Le groupe suit alors une dynamique particulière, les oiseaux exposés au vent se déplaçant un à un sous le vent selon un «algorithme» bien précis.

> De la sorte, la géométrie de l'ensemble évolue vers une forme optimale.

> La température à laquelle se produit cette «danse» en dit long sur l'état des oiseaux, et même du groupe.

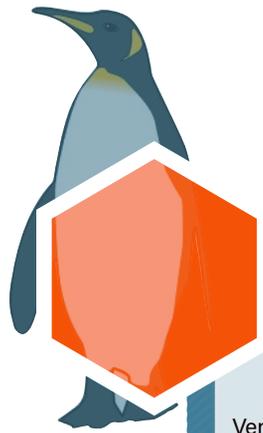
terres. Après la reproduction, les femelles retournent à la mer pour se nourrir et les mâles restent en arrière, chacun incubant un œuf unique dans une poche au-dessus de leurs pieds. Sans nid ni nourriture, ils bravent les éléments en se serrant les uns contre les autres sur la banquise pour maximiser la chaleur ambiante et minimiser l'exposition. La densité atteint jusqu'à dix oiseaux par mètre carré!

À LA RECHERCHE DE MANCHOTS CHAUDS

Vu de loin, le groupe semble glisser sur la glace, poussé par les vents forts. Dans les faits, c'est plus complexe, car les oiseaux ne se déplacent pas à l'unisson. Les manchots au centre du regroupement, où la température avoisine les 38 °C, sont quasi immobiles. En revanche, un oiseau de la périphérie, exposé au vent, se déplace rapidement vers le côté sous le vent, plus chaud (*voir la figure page ci-contre*). À mesure que celui-ci est imité par ses congénères, les manchots du centre se retrouvent bientôt eux aussi balayés par la bise. Viendra alors leur tour de rejoindre le côté moins exposé.

Ce type de rassemblement dure généralement quelques heures, pendant lesquelles les manchots alternent plusieurs fois leur position, entre extérieur froid et centre chaud. Au cours de ce processus, chaque individu donne la priorité à sa propre chaleur, mais celle-ci bénéficie à tous.

Les manchots semblent savoir ce que les mathématiciens ont appris il y a deux cent

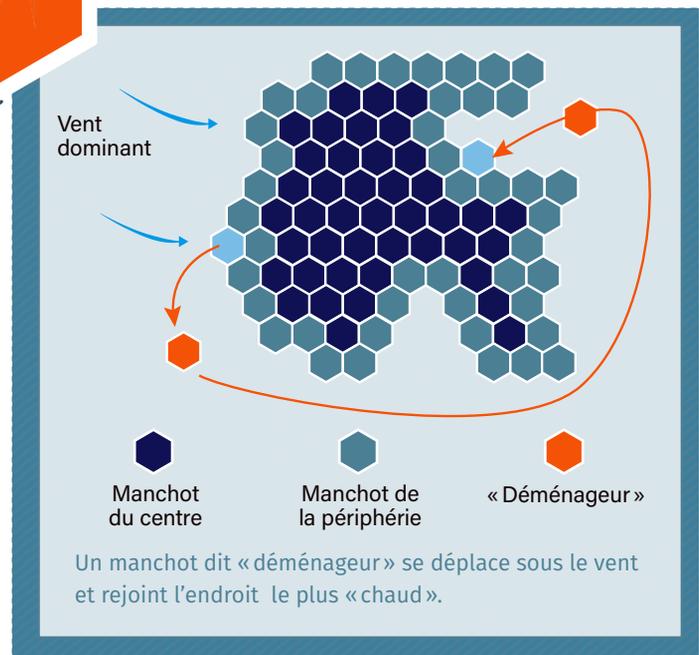


cinquante ans, à savoir que l'empilement compact le plus dense (pour des objets identiques) sur un plan suit un schéma hexagonal: Joseph-Louis Lagrange prouva en 1773 qu'aucun arrangement régulier n'est plus dense. Selon le modèle de François Blanchette, les oiseaux se disposent comme si chacun d'eux se tenait sur un hexagone d'une grille.

COUP DE FROID SUR LES DÉMÉNAGEURS

La plupart des groupes sont au départ irréguliers. Puis le vent et le froid incitent un premier manchot, dit «déménageur», à passer sous le vent. Là, il choisit comme nouveaux voisins ceux qui sont les plus chauds, c'est-à-dire ceux qui perdent le moins de chaleur, et s'installe à leur proximité sans les déranger. Notons que le déménageur peut choisir, ou non, un emplacement qui maximise le nombre de nouveaux voisins, tout ce qui compte pour lui dans le modèle est de trouver les manchots qui perdent le moins de chaleur. Une fois installés, un ou plusieurs de ses nouveaux voisins se retrouvent parfois à l'intérieur du groupe sans avoir jamais bougé. Pendant ce temps, au vent, c'est l'inverse: des oiseaux auparavant à l'intérieur sont désormais exposés. Progressivement, l'ensemble évolue et devient plus régulier jusqu'à adopter une forme oblongue avec des côtés droits et des extrémités arrondies face au vent et sous le vent.

Sans le savoir, les oiseaux ont trouvé un arrangement presque parfait. «Nous avons

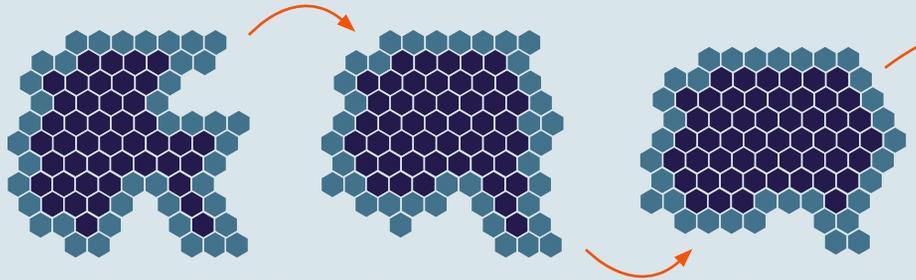


79

cherché une meilleure façon pour les manchots de se regrouper, mais cela impliquait toujours un être omniscient qui les guiderait», a déclaré François Blanchette.

Mais qu'est-ce qui pousse en premier lieu ces oiseaux à se blottir plumes contre plumes? Pour le savoir, l'équipe de Daniel Zitterbart a conçu et installé un observatoire robuste et télécommandé dans la baie d'Atka, en Antarctique, côté Atlantique, là où vit une importante colonie de manchots empereurs (10000 individus en 2020), afin de compléter les observations des chercheurs sur place. Elle a ainsi pu élaborer des modèles mathématiques qui prévoient avec précision les regroupements.

Un groupe se forme de façon aléatoire selon des contours irréguliers, mais adopte peu à peu une forme régulière, oblongue, à deux longs côtés parallèles et deux extrémités circulaires, l'une face au vent, l'autre sous le vent.



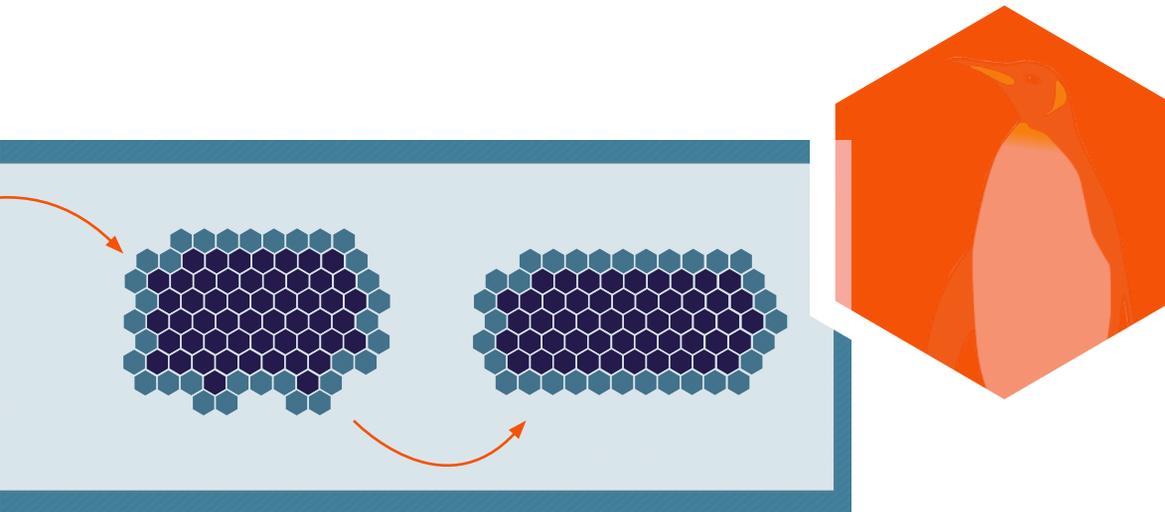
80

La température apparente à laquelle les manchots se regroupent est une mesure indirecte de leur teneur moyenne en graisse et de leurs réserves énergétiques

Pour comprendre le ressenti des oiseaux, qui détermine leur comportement, les chercheurs ont développé la notion de «température apparente», qui reflète la façon dont l'humidité, la vitesse du vent et le rayonnement solaire affectent la perception de la température par le manchot, un peu comme le vent diminue la température ressentie par les humains. Les chercheurs ont également dû tenir compte de leur cycle de reproduction. En effet, au début, les oiseaux sont plus volumineux, car ils reviennent de leur quête de nourriture, tandis qu'à la fin ils sont maigres et ont épuisé leurs réserves de graisse. En conséquence, les températures déclenchant le besoin de se blottir sont plus basses dans le premier cas que dans le second.

Daniel Zitterbart et ses collègues ont rassemblé suffisamment de données pour faire des prédictions précises en fonction de tous ces facteurs. Par exemple, à un moment du cycle de reproduction, ils sont en mesure de dire qu'une température apparente de $-42,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ correspond au seuil en deçà duquel les manchots ont une probabilité supérieure à 50% de se réunir. En d'autres termes, à cette température, les oiseaux passent d'une configuration lâche à un regroupement dense.

Les rassemblements de manchots sont si prévisibles mathématiquement que la température



apparente à laquelle ils se regroupent est une mesure indirecte de leur teneur moyenne en graisse et de leurs réserves énergétiques. «Au lieu de peser chaque manchot individuellement, c'est comme si nous pesions 25 000 manchots en même temps», résume Daniel Zitterbart.

La prochaine étape consistera à déterminer si la température déclenchant le regroupement renseigne sur l'évolution de la santé de la colonie. Comment? Les oiseaux ayant accès à des quantités de nourriture stables durant de nombreuses années devraient arriver sur leurs lieux de reproduction avec des réserves énergétiques et une isolation graisseuse constantes. Aussi la température apparente à laquelle ils se blottissent (à un moment donné du cycle de reproduction) devrait-elle être également la même chaque année. Des manchots commençant à se rassembler à des températures apparentes plus élevées que prévu trahiraient un approvisionnement en nourriture diminué, quelle qu'en soit la raison.

En fin de compte, le comportement mathématiquement défini de ces oiseaux devient un précieux indicateur sur de nombreux paramètres. Prendre en photo des manchots qui se blottissent les uns contre les autres et relever les températures remplacent ainsi des campagnes océaniques coûteuses. Cela marche beaucoup moins bien avec les bisons...

— L'autrice —

> Susan D'Agostino

est docteure en mathématiques au Dartmouth College, autrice et journaliste.

Ce texte est une adaptation de l'article «Math of the penguins», publié sur [Quantamagazine.org](https://quantamagazine.org) le 17 août 2020.

— À lire —

> **A. Houstin et al.**, Biologging of emperor penguins – Attachment techniques and associated deployment performance, *Plos One*, 2022.

> **S. Richter et al.**, Phase transitions in huddling emperor penguins, *J. of Physics D : Applied Physics*, 2018.

> **A. Waters et al.**, Modeling huddling penguins, *Plos One*, 2012.

Ils savent se reconnaître dans un miroir, se servir d'outils rudimentaires et même en fabriquer. Ils n'ont pourtant qu'une... cervelle d'oiseau ! Paradoxe ?

Dans la tête d'un piaf

Onur Güntürkün



Une corneille noire (*Corvus corone*)
a comme d'autres corvidés
d'excellentes aptitudes cognitives.

En bref

> Les corvidés, perroquets et d'autres espèces encore ont des aptitudes cognitives de haut niveau, comme le raisonnement, la flexibilité mentale, la planification, la cognition sociale et l'imagination.

> Or leur cerveau est minuscule et dénué de cortex, contrairement à celui des mammifères, qui est plus gros et dont le cortex assure justement ces capacités cognitives complexes.

> La taille du cerveau des oiseaux est compensée par une grande densité de neurones et des signaux neuronaux qui circulent plus vite entre les réseaux cérébraux.

84

Gertie est une pie bavarde *Pica pica* comme vous en avez déjà souvent croisé. Mais pas tout à fait... En 2006, nous lui avons recouvert la tête, puis collé à son insu un papier jaune sur le plumage noir de sa gorge. Nous l'avons ensuite décapuchonnée et laissée seule face à un miroir. Qu'a-t-elle fait? Se voyant dans le miroir, Gertie s'est vigoureusement gratté la gorge pour retirer le papier! Les enfants de plus de 18 mois et les singes, entre autres, passent ce test dit « du miroir » haut la main, mais jamais encore on n'avait vu un oiseau le réussir.

À cette époque, seuls les humains et quelques mammifères dotés d'un gros cerveau avaient passé avec succès l'expérience du miroir, laquelle met en évidence une aptitude cognitive complexe: la conscience de soi, ou la capacité de se reconnaître en tant qu'individu. Ce résultat ébranlait l'idée dominante depuis plus d'un siècle selon laquelle de telles capacités nécessitent un gros cortex. Selon cette théorie, les oiseaux, dépourvus dudit cortex, ne pouvaient qu'échouer à des tests cognitifs complexes. Depuis quelques années, on se rend compte de l'inanité de cette vision, et l'on découvre que les oiseaux ont conscience d'eux-mêmes, apprennent des choses complexes et prennent des décisions.

Pourquoi les en croyait-on incapables? À cause de Ludwig Edinger. À la fin du XIX^e siècle, ce neuroanatomiste de l'université Goethe, à Francfort, a consacré sa vie à étudier l'évolution du cerveau et de la cognition des vertébrés. Selon lui, l'évolution progresse pas à pas depuis des formes primitives vers des formes complexes, de

sorte qu'à partir des poissons, elle aurait successivement produit les amphibiens, les reptiles, les oiseaux puis les mammifères. Il a ainsi révélé que la plupart des composants de base du cerveau ont toujours existé chez les vertébrés.

LES OISEAUX, « BÊTES » ?

Toutefois, la couche la plus externe du cerveau aurait subi des changements évolutifs plus importants que le reste, et serait la cause de l'augmentation des capacités cognitives. En effet, le cerveau primitif des vertébrés comporte deux parties principales: le pallium, plus externe, et le sous-pallium, plus interne. Chez les mammifères, le pallium comprend principalement le cortex à six couches, siège des aptitudes cognitives de haut niveau, mais aussi des régions plus petites et plus centrales, comme l'hippocampe, impliqué dans la mémoire. Quant au sous-pallium des mammifères, il s'agit d'une masse homogène de neurones.

Il en va autrement des oiseaux. Sur les dessins anatomiques d'Edinger, difficile de distinguer le pallium du sous-pallium... En effet, il a considéré qu'une grande partie du premier relevait du second. Conséquence, les oiseaux ont un énorme sous-pallium et un tout petit pallium. D'où l'idée de capacités cognitives modestes... Erreur! Cependant, les idées d'Edinger, scientifique renommé à son époque, ont persisté et influencé les neurosciences jusqu'à l'aube du XXI^e siècle.

Autre raison invoquée, la taille du cerveau des oiseaux, en comparaison avec ceux des



Une pie bavarde retire un autocollant de son plumage quand elle se voit dans un miroir : elle se reconnaît et a conscience d'elle-même en tant qu'individu distinct.

mammifères. De fait, les autruches ont le plus gros, à savoir 26 grammes, à comparer aux 400 grammes du cerveau d'un chimpanzé et aux 9 kilogrammes de celui d'un cachalot... Et, pour les primates au moins, plus le cerveau est gros, plus les capacités cognitives sont élevées. Pourtant, Gertie a passé le test du miroir avec succès, ce dont sont incapables la plupart des mammifères ayant un plus gros cerveau qu'elle. Comment est-ce possible ?

Les corbeaux de Nouvelle-Calédonie *Corvus moneduloides* ont contribué à répondre. Ces oiseaux vivent surtout des larves qu'ils extraient de l'écorce des arbres. En 1996, Gavin Hunt, de l'université d'Auckland, en Nouvelle-Zélande, a déjà constaté qu'ils fabriquent pour ce faire deux types d'outils. Et le processus de fabrication de ces derniers est si complexe que Hunt l'a comparé à celui des humains du Paléolithique moyen pour leurs outils lithiques !

Chez d'autres espèces utilisant des outils, ces comportements reposent souvent sur des réactions innées, préprogrammées, et non sur des traitements cognitifs de résolution de problèmes. Est-ce le cas des corbeaux ? Non, ont découvert Alex Taylor, de l'université d'Auckland, et Russel Gray, de l'institut Max-Planck à Iéna, en Allemagne. Leurs travaux ont montré que ces oiseaux résolvent plusieurs problèmes en raisonnant : ils planifient leurs actions en se représentant mentalement des objets invisibles, et en déduisent des relations de cause à effet entre les événements observés.

Qu'en est-il de leur cognition sociale ? Les corbeaux calédoniens savent travailler en équipe,

mais ils ne comprendraient pas que leurs congénères collaborent au même titre qu'eux à une tâche. En d'autres termes, les partenaires occasionnels ne représentent que des « outils sociaux » facilitant l'accomplissement d'un objectif et non des individus à part entière. En effet, ces oiseaux regardent les autres manipuler des objets, mais passent à côté des détails du comportement de leurs congénères qui révéleraient les séquences d'action pertinentes. Plusieurs expériences ont été menées avec d'autres corvidés. Certaines ont montré que les jeunes n'ayant pas de partenaire sexuel ni de territoire forment des bandes temporaires qui se rassemblent près d'une source alimentaire, par exemple une carcasse. Quand certains grands prédateurs protègent une cachette de nourriture, les corbeaux font alors appel à des membres de leur bande pour faire diversion et ainsi avoir accès à leur pitance.

NE TIREZ PAS SUR L'OISEAU MENTEUR

Sur quoi repose une telle cognition sociale ? Un prérequis indispensable est, pour chacun d'eux, de connaître le réseau auquel il appartient et de savoir déterminer les intentions de tout individu rencontré. De fait, les corbeaux sont constamment attentifs aux indices révélant qu'une relation de domination a changé. Et ils utilisent leur savoir lorsqu'ils sont attaqués par un corbeau dominant. De plus, le rang hiérarchique d'un individu augmentant après un accouplement, les corbeaux surveillent les relations se formant, voire les

Pourquoi les oiseaux sont intelligents

Des études scientifiques récentes ont fait perdre tout son sens à l'expression «cerveau d'oiseau»... En effet, l'évolution a produit chez les oiseaux une organisation neuronale différente de celle des mammifères, mais qui aboutit à des aptitudes cognitives très similaires.

UNE VISION QUI A CHANGÉ

Jusqu'en 2004, on pensait les oiseaux dotés d'un tout petit pallium. Désormais, on sait qu'il est comparable, en proportion, à celui du macaque.

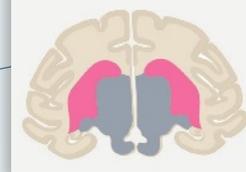
Cerveau de pigeon (conception d'avant 2004)



Cerveau de pigeon (conception d'aujourd'hui)



Cerveau de macaque



- Pallium
- Sous-pallium
- Autres régions cérébrales

Pigeon

Macaque

Humain

SYSTÈME SENSORIEL

- Centre visuel primaire
- Centre visuel secondaire
- Audition
- Somesthésie

SYSTÈMES LIMBIQUE ET MNÉSIQUE

- Hippocampe
- Amygdale
- Cortex préfrontal / Nidopallium caudolatéral
- Aires motrices

SIMILAIRES, MAIS AILLEURS

Les oiseaux disposent de centres de traitement sensoriel et cognitif à peu près équivalents à ceux des primates, mais leurs emplacements diffèrent. Ainsi, le nidopallium caudolatéral est à l'arrière chez les oiseaux, alors que le cortex préfrontal des primates, aux fonctions semblables, est à l'avant.

Alex le perroquet était capable de catégoriser des objets, des actions et des quantités numériques

perturbent de façon agressive... pour empêcher leurs concurrents de gravir les échelons!

Autre capacité cognitive importante: une «théorie de l'esprit», dont font preuve les corbeaux lorsqu'ils empêchent d'autres oiseaux d'observer leurs réserves, ou lorsqu'ils guettent constamment leurs concurrents afin de piller leurs planques dès qu'ils en ont l'occasion. Ces oiseaux sauraient donc se mettre à la place des autres. Et des corbeaux trompent parfois des pillers potentiels en les guidant vers un endroit vide, où ils font semblant d'avoir des réserves. Un peu comme s'ils savaient mentir.

Une bonne maîtrise de soi et une solide compréhension du moment opportun pour la confrontation ou la fuite lors de leurs interactions avec autrui complètent ces aptitudes. Can Kabadayi et Mathias Osvath, de l'université de Lund, en Suède, ont montré que les corbeaux planifient différents types d'événements futurs. Par exemple, ils choisissent un outil, comme un bâton, plutôt qu'une petite récompense immédiatement disponible, quand ils savent qu'avec l'outil ils auront accès plus tard à une récompense plus importante. Et tout ça, avec un cerveau de seulement 14 grammes!

Les geais buissonniers (du genre *Aphelocoma*), des corvidés plus petits que les corbeaux et corneilles, sont tout aussi performants lors de tâches cognitives complexes. Les perroquets ne sont pas en reste! En témoigne Alex (1976-2007), le perroquet gris d'Irene Pepperberg, de l'université Harvard. Avec ses collègues, elle avait montré qu'Alex (pour *Avian learning experiment*, expériences d'apprentissage des oiseaux) était capable de catégoriser des objets, des actions et

des quantités numériques (jusqu'à huit) et même d'effectuer des additions très simples. Plus largement, les perroquets comprennent le concept de taille relative, discernent l'absence de quelque chose et détectent les similitudes et les différences entre objets.

Face à ces résultats, les primatologues ont argué que les oiseaux ne seraient performants que dans certaines tâches cognitives, contrairement aux primates, bien plus habiles dans tous les domaines... Pour le vérifier, l'éthologue Thomas Bugnyar et moi avons analysé presque toutes les études portant sur huit aspects de la cognition complexe des primates non humains et des corvidés et perroquets. Résultat: les aptitudes cognitives de ces oiseaux et des singes sont très semblables.

DES PIGEONS QUI LISENT...

Même les pigeons, avec seulement 2 grammes de cerveau, sont plus intelligents qu'on ne le pense. À l'université de Bochum, Lorenzo von Fersen et Juan Delius ont montré que ces oiseaux mémorisent jusqu'à 725 motifs abstraits et utilisent la logique d'inférence transitive, qui consiste, par exemple, à déduire que A est plus grand que C sachant A plus grand que B et B plus grand que C.

Récemment, avec Damian Scarf et Mike Colombo, de l'université d'Otago, en Nouvelle-Zélande, nous avons même prouvé que les pigeons peuvent distinguer des mots anglais de quatre lettres de «faux mots», composés d'une voyelle et de trois consonnes combinées de différentes façons. Globalement, les pigeons sont

aussi performants que les corvidés ou les perroquets dans diverses tâches cognitives, mais pas dans toutes... Et quand ils réussissent, il leur faut souvent plus de temps que ces derniers pour maîtriser la tâche et nettement plus d'entraînement pour saisir une règle abstraite.

D'où proviennent ces aptitudes cognitives complexes, sachant que les oiseaux n'ont pas de cortex? Dès les années 1960, Harvey Karten, de l'université de Californie à San Diego, a découvert que la plus grande partie du sous-pallium mis en évidence par Edinger correspond en fait à du pallium. Puis il a montré que les voies neuronales sensorielles et motrices reliant le pallium à d'autres régions du cerveau des oiseaux sont identiques à celles du cortex des mammifères. En 2002, des neuroscientifiques ont examiné toutes les preuves accumulées et conclu que le pallium aviaire est en réalité plus grand qu'on ne le pensait, et même qu'il est relativement semblable à celui des mammifères.

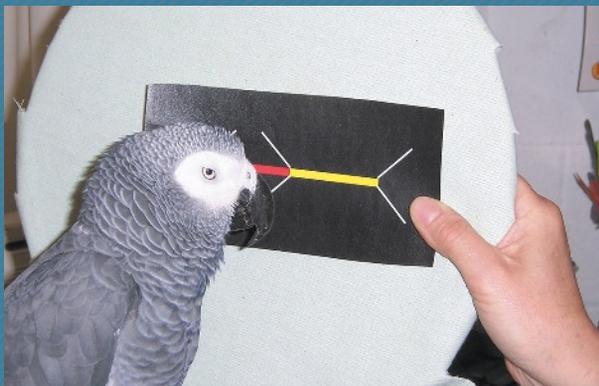
« LA VIE TROUVE UN CHEMIN »

La similitude du pallium des oiseaux avec le cortex des mammifères est encore débattue. Peu importe, finalement, car rappelons que des évolutions biologiques distinctes, mais convergentes, aboutissent parfois à des structures cérébrales dissemblables, remplissant toutefois des fonctions identiques.

Ce serait notamment le cas du cortex préfrontal des mammifères et du pallium des oiseaux. Au

Comment les oiseaux disposent-ils de telles aptitudes cognitives avec un aussi petit cerveau? Il s'avère qu'ils ont plus de neurones qu'attendu, car leur cerveau est bien plus dense que celui des autres animaux

88



Un perroquet gris reconnaît les couleurs tandis qu'un geai buissonnier teste sa mémoire épisodique.

© Ariene Levi-Rowe & Alex Foundation (1); Helena Oswald (2); Nicola Clayton (3)

début des années 1980, Jesper Mogensen et Ivan Divac, de l'université de Copenhague, au Danemark, ont déjà remarqué qu'une région du pallium postérieur du pigeon ressemblait beaucoup au cortex préfrontal des mammifères. Aussi ai-je entamé une série d'expériences pour montrer que cette aire aviaire, le nidopallium caudolatéral, est, comme la région préfrontale des mammifères, une zone de convergence des entrées sensorielles et des commandes sortantes du système moteur. De plus, comme le cortex préfrontal, le nidopallium caudolatéral joue un rôle critique dans toutes les tâches cognitives, et ses neurones codent des fonctions complexes, notamment la prise de décision et l'attribution de valeurs à diverses options avant un choix.

Malgré des fonctions semblables, des indices génétiques et leur emplacement (à l'arrière du pallium pour le premier et à l'avant du cerveau pour le second) suggèrent que ces deux régions ne proviennent pas d'un centre cérébral commun aux oiseaux et aux mammifères... Au contraire, autrefois, elles avaient probablement des fonctions très différentes chez les premiers ancêtres des mammifères et des oiseaux, puis elles auraient convergé en 300 millions d'années pour devenir des régions consacrées à l'intégration cognitive des entrées sensorielles avec les sorties motrices. Pensez à la célèbre phrase du docteur Ian Malcolm dans *Jurassic Park*: «La vie trouve un chemin.»

Pour explorer cette convergence, avec Murray Shanahan, de l'Imperial College de Londres, moi-même et d'autres, nous avons examiné l'organisation du connectome, à savoir l'ensemble des connexions cérébrales, du pallium du pigeon. Résultat? Il est très similaire à celui des mammifères.

UN CERVEAU DENSE

Mais une question reste en suspens: comment font les oiseaux avec un si petit cerveau? Seweryn Olkowicz et Pavel Němec, de l'université Charles, à Prague, en République tchèque, et Suzanaerculano-Houzel, de l'université Vanderbilt, aux États-Unis, ont répondu en étudiant le nombre de neurones de 28 espèces d'oiseaux. Surprise: leur cerveau, en particulier celui des corvidés et des perroquets, contient deux fois plus de neurones que sa taille le laissait supposer. Et ce surplus se trouve surtout dans le pallium.

Mais même avec plus de neurones qu'attendu, les oiseaux en ont encore beaucoup moins que les mammifères, étant donné la toute petite taille de leur cerveau... pour des aptitudes cognitives, rappelons-le, presque semblables. En fait, une plus grande densité de neurones entraîne une diminution des distances de communication entre eux. Dans les tâches où l'information est transmise de façon répétée entre des groupes de neurones dans un cerveau dense, il en résulte un gain de temps. De fait, les pigeons réagissent parfois plus rapidement que les humains lors de certaines tâches cognitives. Toujours à propos des pigeons, nous avons également montré, en 2022, que leurs neurones consomment trois fois moins d'énergie que ceux des mammifères. Rapides et économes, donc.

Ainsi, les oiseaux et les mammifères ont emprunté des chemins différents – les premiers ont «densifié» leurs neurones, les seconds ont augmenté la taille de leur cerveau –, mais ils ont développé des mécanismes neuronaux et des modes de pensée similaires. Pour une «cervelle d'oiseau» finalement plus proche qu'on ne le croyait de celle des grosses têtes.

— L'auteur —

> Onur Güntürkün

est professeur de biopsychologie à l'université de la Ruhr, à Bochum, en Allemagne.

— À lire —

> K. von Eugen *et al.*, Avian

neurons consume three times less glucose than mammalian neurons, *Current Biology*, 2022.

> R. Pusch *et al.*, Visual categories and concepts in the avian brain, *Animal Cognition*, 2022.

> O. Güntürkün *et al.*, Avian pallial circuits and cognition: A comparison to mammals, *Current Opinion in Neurobiology*, 2021.

> M. Stacho *et al.*, A cortex-like canonical circuit in the avian forebrain, *Science*, 2020.

Les chants des oiseaux captivent par leurs mélodies. Mais les oiseaux eux-mêmes ne les entendent pas de cette oreille: c'est à de fins détails acoustiques, inaudibles à l'oreille humaine, qu'ils prêtent attention.

Le sens caché du chant

Adam Fishbein



L'important pour les oiseaux
dans leurs chants n'est pas audible
à l'oreille humaine.

Qu'il s'agisse du «psi psi – du du du du du» de la mésange bleue *Cyanistes caeruleus*, du «tu tu tu tu... djiit djiit djiiit» du verdier d'Europe *Chloris chloris*, du «tji tji tji tiup tjiup tjiup tjiup tu tu tu ui tu» du pinson des arbres *Fringilla coelebs*, du «tsit... tsit... tsit...» de la cisticole des joncs *Cisticola juncidis*, du «woup woup woup» de la huppe fasciée *Upupa epops*... les chants des oiseaux intriguent, au moins depuis Aristote et son *Histoire des animaux* (343 avant notre ère).

On les décrit d'habitude comme des séries de vocalisations, longues et souvent complexes, destinées à attirer un partenaire ou à défendre un territoire. Les *chants* d'oiseau sont à distinguer des *cris*, qui, pour leur part, sont instinctifs, simples et brefs, et qui serviraient à signaler un prédateur, de la nourriture... Cette opposition n'est pour autant pas évidente, puisque des oiseaux ont un chant plus simple que leurs cris... Aussi peut-on définir plus strictement un chant d'oiseau comme un enchaînement de sons allongés et complexes.

PAR-DELÀ LA MÉLODIE

La terminologie que nous employons reflète bien le fait que, pour nous, un chant d'oiseau évoque soit un langage, soit de la musique. Ainsi, lorsque des chercheurs l'analysent, ils le décomposent en notes ou en syllabes, bref, en sons courts, qu'ils regroupent ensuite en séquences appelées «phrases» ou «motifs», que structurent des rythmes et des temps caractéristiques. C'est de cette façon que les chercheurs mettent en général en évidence des traits du chant aviaire – types de syllabes, phrases –, qui sont potentiellement importants.

Toutefois, quelle valeur a cette façon d'analyser l'activité sonore aviaire? Et les oiseaux

En bref

> Dans le chant des oiseaux, les humains entendent des phrases ou des mélodies.

> Des expériences suggèrent qu'il en va autrement des oiseaux, qui perçoivent avant tout la structure fine de chaque note.

> On ignore encore si cette structure fine transmet des informations, mais il est clair que l'agencement des notes (la mélodie) ne joue pas cette fonction de communication chez les oiseaux.

eux-mêmes, comment perçoivent-ils leurs «chants»? Mes recherches, avec d'autres, révèlent qu'ils ne les perçoivent pas de la même façon que nous. Plutôt que de prêter attention aux mélodies comme nous le faisons spontanément, ils perçoivent avant tout des structures acoustiques complexes contenues dans les sons qui, mis bout à bout, constituent leurs chants. Ces structures fines vont bien au-delà de ce que nos oreilles sont capables de percevoir.

Les chercheurs ont suspecté dès les années 1960 que les oiseaux perçoivent les chants de leurs congénères autrement que nous. Les expériences de «*playback*» sont l'une des approches les plus utilisées pour comprendre la perception des volatiles: les chercheurs les confrontent, dans leur environnement naturel, à des chants préenregistrés et observent leurs réactions. Principale constatation? Face à des chants de leur propre espèce, de nombreux oiseaux réagissent comme s'ils avaient affaire à une intrusion territoriale. Ils volettent autour du haut-parleur diffusant le chant à la recherche de l'intrus, crient ou émettent des chants menaçants. En comparant leurs réactions à des chants naturels et à des chants modifiés artificiellement, on met en évidence ce qui joue un rôle essentiel dans leur perception.

Dans les années 1970, Stephen Emlen, de l'université Cornell, aux États-Unis, a mené une expérience de *playback* devenue un classique avec le passerin indigo. Les mâles de cette espèce d'un bleu éclatant émettent surtout des paires de syllabes. Sur un spectrogramme – une représentation graphique du son reliant fréquence et amplitude, c'est-à-dire hauteur et intensité des sons –, cette structure en paires de notes est clairement visible (*voir l'encadré*



ci-contre). Stephen Emlen constata que des oiseaux confrontés à des chants sans paires de notes avaient le même genre de réaction territoriale que si on leur faisait écouter des chants non modifiés. Ainsi, les paires de notes – une structure si importante à nos oreilles – ne jouent pas de rôle crucial dans la reconnaissance de leurs congénères par les passerins indigos mâles. Si ces oiseaux pouvaient décrire la structure de leurs chants, ce serait d'une façon sensiblement différente de la nôtre!

En laboratoire, l'étude de la perception auditive des oiseaux est plus précise que dans leur environnement naturel et les conditions expérimentales bien mieux contrôlées. Lors d'un test d'audition chez un ORL, celui-ci vous demande de lever la main ou d'appuyer sur un bouton lorsque vous entendez quelque chose. Les chercheurs ne s'y prennent pas autrement avec des oiseaux: ils emploient un système de récompenses alimentaires pour les entraîner à pousser un bouton du bec quand ils entendent quelque chose ou perçoivent un son particulier.

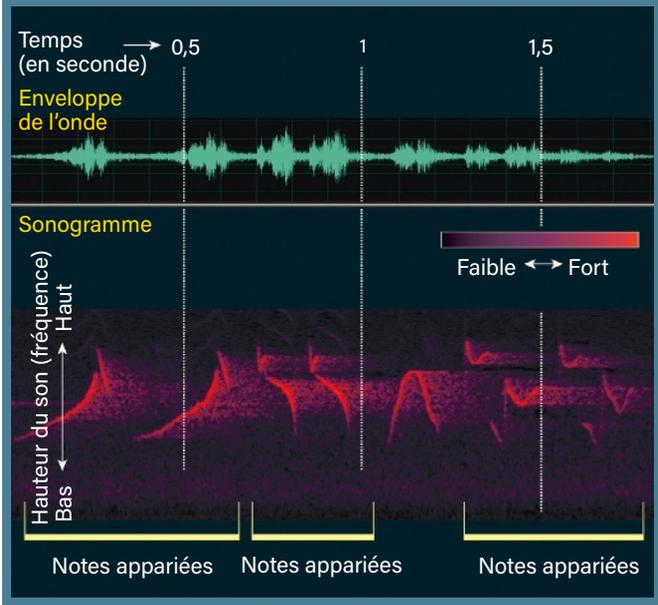
Ce genre de recherche en laboratoire a mis en évidence de nombreuses similitudes entre les perceptions auditives des oiseaux chanteurs et des humains, notamment en ce qui concerne les seuils d'audition, les différences de hauteur ou la détection des intervalles séparant les sons. Il a toutefois révélé aussi de frappantes différences.

L'un des principaux résultats de ces travaux est que les oiseaux ont des performances étonnamment faibles lorsqu'il s'agit de reconnaître une mélodie dont les tons ont été décalés vers le haut ou vers le bas. Cette capacité est en revanche naturelle pour nous: lorsque l'air de *Joyeux anniversaire* est joué au piano, nous le reconnaissons, quel que soit le registre emprunté. Dans les

DES NOTES PAR PAIRES

Le chant du passerin indigo est décrit par son enveloppe (*ci-dessous*) et par son sonogramme (*ci-dessous, en bas*). Dans cette dernière représentation du son, le temps est en abscisse et la fréquence en ordonnée, tandis que l'amplitude est traduite par une couleur artificielle (ici, d'autant plus rouge que le son est fort). Pour l'oreille humaine, les notes appariées sont des caractéristiques saillantes du chant, mais le passerin indigo réagit de la même façon à des versions modifiées de son chant dans lesquelles les notes ne sont plus appariées. Il serait sensible à d'autres caractéristiques du chant.

Le chant du passerin indigo



années 1980 et 1990, Stewart Hulse et ses collègues de l'université Johns-Hopkins ont mené des expériences qui, elles aussi, sont devenues des classiques: elles prouvaient qu'une mélodie dont les fréquences sont décalées vers le haut sonne différemment pour un oiseau, même si le motif musical reste le même.

Des recherches ultérieures ont confirmé et précisé ces observations. En 2016, Micah Bregman, alors à l'université de Californie à San Diego, a montré avec des collègues que les étourneaux d'Europe sont capables de reconnaître des séquences dont les tons sont décalés en fréquence, mais à condition que tous les détails fins des sons soient supprimés. La structure fine du son joue donc un rôle essentiel pour les oiseaux qui écoutent un chant.

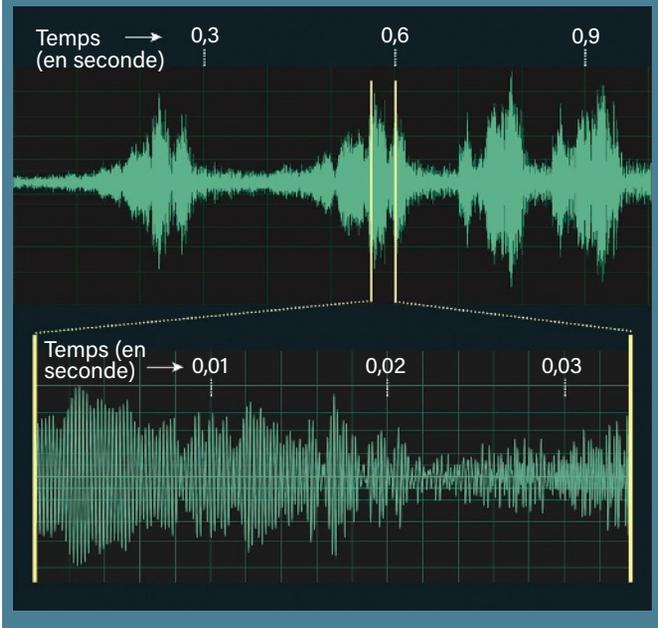
DE L'IMPORTANCE DE LA STRUCTURE FINE

La description physique de toute onde repose sur deux notions essentielles: son enveloppe et sa structure fine. La première est la courbe enveloppant les extrêmes de l'amplitude du signal sonore, lequel peut aussi fluctuer en fréquence. La structure fine d'un son est la façon dont il évolue à l'échelle de la milliseconde en fréquence et en amplitude. La plupart des chercheurs étudiant le chant aviaire l'ont négligée, parce qu'elle passe facilement inaperçue dans les spectrogrammes ou dans les sonogrammes (diagramme temps-fréquence-amplitude) employés pour visualiser le son. Toutefois, si l'on zoome sur la

STRUCTURE FINE

L'examen approfondi du chant du diamant mandarin (*ci-dessous*) met en évidence des détails bien plus fins que l'appariement des notes. En zoomant sur une partie de la deuxième syllabe (*ci-dessous, en bas*), on voit apparaître des fluctuations rapides de la fréquence et de l'amplitude, lesquelles se produisent à l'échelle de la milliseconde.

Le chant du diamant mandarin



forme d'onde d'une syllabe de chant, les détails acoustiques fins apparaissent.

Robert Dooling, de l'université du Maryland, est le premier à avoir étudié la structure fine du chant aviaire en s'efforçant d'évaluer la capacité des oiseaux à la détecter. En 2002, il a décrit comment son équipe a confronté des oiseaux et des humains à des sons ne différant que par leurs structures fines. Toutes les espèces d'oiseaux mises à l'épreuve – diamant mandarin, canari domestique et perruche ondulée – obtinrent de bien meilleurs résultats que les humains en percevant des différences de structure fine deux à trois fois plus petites.

En 2015, lorsque j'ai commencé à comparer chant des oiseaux et langage humain, je n'accordais pas encore d'importance à la structure fine. Comme la plupart des chercheurs, je traquais plutôt des capacités grammaticales semblables aux nôtres. Après nombre d'expériences, je me suis aperçu que la clé de la communication par le chant résidait dans les fins détails acoustiques des notes émises, plutôt que dans leur ordonnancement.

LE SENS DU DÉTAIL

Le diamant mandarin *Taeniopygia guttata*, originaire d'Australie, fut le plus performant des oiseaux testés dans l'expérience de Robert Dooling. Cette espèce est la plus appréciée dans la recherche, en grande partie parce qu'elle chante et se reproduit volontiers en captivité. Seuls les mâles chantent, et d'une façon plutôt simple, et donc facile à étudier : un seul motif de trois à huit syllabes répétées à l'infini, en général dans le même ordre. Les mâles apprenant à la fois les syllabes et la séquence dans laquelle les placer (en général, auprès de leur père), on pourrait penser que ces deux caractéristiques jouent un rôle crucial dans la perception de l'oiseau.

Nous avons testé cette hypothèse en 2018 en évaluant si des diamants mandarins entraînés perçoivent la différence entre des motifs naturels de chant et des motifs modifiés par inversion ou mélange des notes dans le temps. Confrontés à un son répété, quand le son changeait, ils poussaient du bec un bouton et étaient gratifiés d'une friandise pour leur succès. S'ils faisaient de même

alors que le son était inchangé, l'éclairage s'éteignait, et nous considérons cela comme une réponse au hasard. Cette expérience a permis d'estimer la capacité des oiseaux à distinguer entre le son répété – le motif naturel du chant – et de nouveaux sons – des motifs modifiés.

Résultat : les diamants mandarins ont presque parfaitement réussi à repérer les syllabes inversées, très difficiles à détecter pour les humains, mais pas les syllabes mélangées, bien plus évidentes pour nous. Lorsqu'on inverse une syllabe, la structure fine change : il n'est donc pas surprenant qu'ils aient réussi à s'en apercevoir. Leur difficulté à entendre les différences entre séquences est plus inattendue, non seulement parce que ces changements « sautent aux yeux » des oreilles humaines, mais aussi parce que les mâles apprennent un ordre bien particulier de notes de chant. Leur difficulté à percevoir les mélanges de syllabes sonores peut signifier que chez ces oiseaux chanteurs, l'ordre joue un rôle pendant le processus d'apprentissage, mais guère pendant le processus de communication.

Avec mes collègues, nous nous sommes demandé quel rôle jouent les structures fines dans la communication par le chant. Que leur ouïe rende les oiseaux capables de percevoir l'inversion de syllabes est impressionnant, mais ils ne produisent jamais de tels sons... Dès lors, dans quelle mesure les oiseaux vivant dans la nature sont-ils sensibles aux changements acoustiques subtils dans les chants ?

Déjà en 2018, nous avons montré que les diamants mandarins détectent de minuscules

Si ces oiseaux étaient capables de décrire la structure de leurs chants, ce serait d'une façon sensiblement différente de la nôtre!

différences dans la structure fine des chants, lesquelles pouvaient transporter des informations sur le sexe et l'identité individuelle. Pour en savoir davantage, nous avons exploité la simplicité des chansons des diamants mandarins. Simplicité apparente, car dans la réalité il existe de subtiles différences dans la façon dont une syllabe donnée se prononce dans chaque interprétation du motif. Nous avons testé la capacité des diamants mandarins à les percevoir et nous sommes parvenus à la conclusion que les oiseaux distinguaient facilement ces différences.

Cette constatation implique que si, pour nous, le chant du diamant mandarin ressemble à la répétition infinie du même motif, ce n'est pas du tout le cas pour les oiseaux. Selon nous, ils perçoivent toute une série d'informations sur les émotions, la santé, l'âge, l'identité individuelle et bien d'autres choses encore dans la structure fine du chant. Ces informations sont convoyées



TRI SONORE

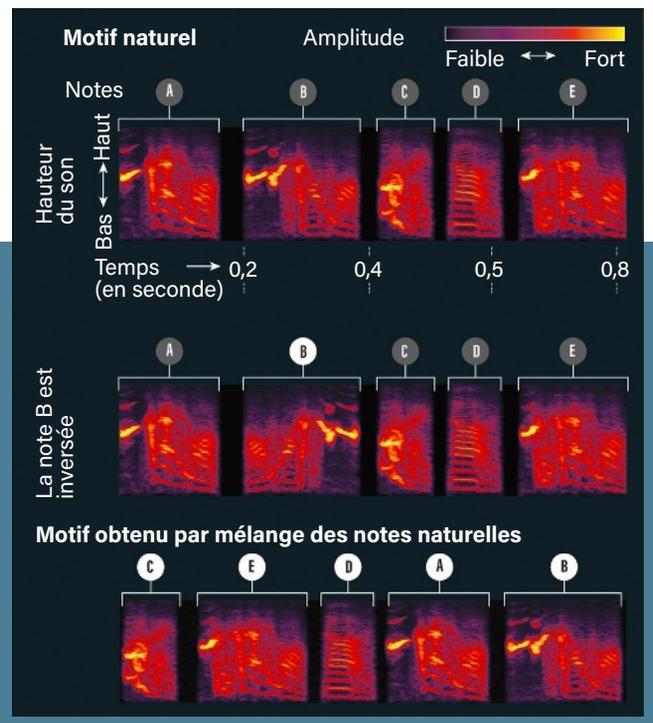
Le chant du diamant mandarin se compose en apparence d'une série de motifs identiques de plusieurs notes distinctes. Ces motifs se singularisent toutefois considérablement dans leurs structures fines, de sorte que les oiseaux interprètent différemment un même motif. Dans les sonogrammes présentés, le motif naturel est en haut. Au milieu, le même motif, mais dont la structure de la deuxième syllabe est inversée. En bas, le même motif, mais avec un ordre différent des syllabes. Les cercles blancs indiquent les syllabes soit inversées, soit mélangées.

© Adam Fishbein (onde et spectrogramme) ; Liz Wahid (diamant mandarin)

DES MÉCANISMES SIMILAIRES CONTRÔLENT L'APPRENTISSAGE ET LA PRODUCTION DE LA VOIX CHEZ LES OISEAUX ET LES HUMAINS

97

Le chant du diamant mandarin



par des détails bien au-delà de ce qui est détectable pour nos oreilles. Il est dès lors raisonnable de penser que d'autres oiseaux aux chants apparemment répétitifs pour des humains partagent la finesse de perception du diamant mandarin.

SYRINX VS LARYNX

Ces microfluctuations acoustiques sont-elles accidentelles ou aléatoires? L'appareil phonatoire aviaire joue sans doute un rôle essentiel dans cette question. Les humains produisent des sons articulés à partir d'une unique source située au sommet du cou: le larynx. Les oiseaux, en revanche, disposent d'une structure à deux branches, donc de deux sources sonores, situées au sommet des poumons: la syrinx. Chaque branche de cet organe est une source de son indépendante de l'autre. Les muscles de la syrinx se contractent en outre plus vite que tout autre muscle de vertébré, ce qui rend possible un contrôle du son à l'échelle de la milliseconde. Ainsi, les oiseaux, en plus de percevoir très finement les sons, produisent volontairement d'infimes variations acoustiques grâce au contrôle très fin qu'ils ont de leur appareil phonatoire et de ses deux sources!

Ensemble, ces recherches montrent que les oiseaux écoutent les chants aviaires autrement que ce que nous nous imaginons. Lorsque nous écoutons de la musique ou des paroles, ce sont les mélodies et la structure des phrases qui retiennent notre attention, et nous sommes incapables de ne pas rechercher ces structures dans les chants d'oiseau. Pour les oiseaux, les différences entre phrases n'ont guère d'importance. Certaines espèces ont même du mal à percevoir des changements simples, qui pour nous perturbent totalement le message ou la mélodie. Les oiseaux écoutent en revanche de très près les détails acoustiques de chacune des notes du chant, indépendamment de l'ordre dans lequel elles arrivent. Ce faisant, ils perçoivent des détails absolument imperceptibles pour nous.

Cela ne veut pas dire qu'il n'existe aucun parallèle entre le chant des oiseaux et la parole ou la musique humaine. L'aptitude à reproduire en chantant ou en parlant les sons que l'on entend, comme savent le faire les humains et les oiseaux, est une rareté dans le règne animal. Les autres primates, et même nos proches cousins

vivants, les chimpanzés, en sont incapables. Même les mammifères qui font preuve d'une certaine capacité d'apprentissage vocal (les baleines, les éléphants, les otaries...) n'atteignent pas le niveau de mimétisme vocal des humains et de certains oiseaux.

Plus étonnant encore, des chercheurs, comme Erich Jarvis, de l'université Rockefeller, ont montré que des voies neuronales et des mécanismes moléculaires similaires contrôlent l'apprentissage et la production de la voix chez les oiseaux chanteurs et chez les humains, ce qui est un exemple de convergence évolutive. Ainsi, en étudiant les oiseaux, nous en apprenons aussi sur la communication vocale humaine!

— L'auteur —

> **Adam Fishbein** est éthologue à l'université de Californie à San Diego, aux États-Unis.

— À lire —

> **A. Fishbein**, Auditory pattern discrimination in budgerigars (*Melopsittacus undulatus*), *Behavioural Processes*, 2022.

> **A. Fishbein et al.**, Sound sequences in birdsong: How much do birds really care?, *Phil. Trans. R. Soc. B*, 2019.

> **S. L. Lawson et al.**, Relative salience of syllable structure and syllable order in zebra finch song, *Animal Cognition*, 2018.

> **R. J. Dooling et al.**, Auditory temporal resolution in birds: Discrimination of harmonic complexes, *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2002.



AcademiaNet offre un service unique aux instituts de recherche, aux journalistes et aux organisateurs de conférences qui recherchent des femmes d'exception dont l'expérience et les capacités de management complètent les compétences et la culture scientifique.

AcademiaNet, base de données regroupant toutes les femmes scientifiques d'exception, offre:

- Le profil de plus des 2.300 femmes scientifiques les plus qualifiées dans chaque discipline – et distinguées par des organisations de scientifiques ou des associations d'industriels renommées
- Des moteurs de recherche adaptés à des requêtes par discipline ou par domaine d'expertise
- Des reportages réguliers sur le thème «Women in Science»

Partenaires

Robert Bosch **Stiftung**

Spektrum
der Wissenschaft

nature

Pour la Science

Les vautours repèrent-ils les carcasses à l'odeur? En 1826, cette question fut le point de départ d'une controverse qui n'a trouvé son dénouement que récemment.

100

L'épineuse question du **flair** des oiseaux

Benoit Grison

L'urubu à tête rouge *Cathartes aura*,
comme 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.



En bref

> Si Aristote et Pline 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.

102

Dans *Les Neiges du Kilimandjaro* (1952), Gregory Peck, dans le rôle d'un écrivain désabusé et grand amoureux de l'Afrique, est victime d'un accident de safari qui le cloue dans un camp de brousse, à attendre 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.»

Dans un contexte moins dramatique, cette même question a tarabudé naturalistes puis biologistes du comportement durant deux siècles. De fait, la majorité des ornithologues ont tenu durablement les oiseaux pour des créatures dépourvues de tout odorat, «anosmiques». Mais, ces dernières années, des découvertes étonnantes ont montré que beaucoup d'espèces aviennes ont bel et bien «du nez».

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, surpassant parfois ceux des humains et des autres vertébrés. Pendant longtemps, la seule exception notable est restée le kiwi, aptère (sans ailes) de Nouvelle-Zélande, animal nocturne et fouisseur, friand de lombrics, qu'il détecte à l'odorat.

Si les naturalistes antiques, Aristote ou encore Pline l'Ancien, défendaient la réalité de l'odorat

avien, l'idée fut abandonnée. Jean-Jacques Audubon fut parmi les premiers à relancer le débat sur la question. En 1826, l'ornithologue franco-américain croisa ainsi le fer au sujet des rapaces avec un autre naturaliste star, l'explorateur britannique Charles Waterton. Ce dernier, grand connaisseur des forêts guyanaises, affirmait avoir souvent observé des urubus à tête rouge *Cathartes aura*, de grands vautours, attirés par l'odeur de carcasses. Jugeant ce témoignage totalement erroné, Audubon s'en prit avec véhémence à son collègue.

Si la réputation scientifique de Charles Waterton était alors à son zénith, Audubon jouissait d'un avantage indéniable sur son rival: il avait conduit des expériences sur des urubus. Utilisant, entre autres, des cadavres de porcs, il prétendait avoir montré que ces vautours délaissaient les cadavres lorsqu'ils sont recouverts de végétaux. Son ami le révérend Bachman dupliqua ses expérimentations avec plus de rigueur.

Malheureusement pour ses conclusions, Audubon aurait recouru par erreur à une autre espèce que l'urubu à tête rouge, à savoir l'urubu noir *Coragyps atratus*, d'apparence assez proche. Quant à Bachman, on sait aujourd'hui qu'il avait grandement sous-estimé l'exigence alimentaire de l'urubu à tête rouge: s'il en a la possibilité, l'oiseau «récuse» les carcasses en décomposition (comme celles utilisées par l'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.

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



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.



De son côté, Charles Darwin fut prompt à souligner qu'il était impensable 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. D'autant plus qu'à la même époque, 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 l'urubu à tête rouge.

ÇA SENT LE GAZ...

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 ne partagent pas. Ce sens est si développé chez lui qu'aux États-Unis les attroupements d'urubus à tête rouge autour des pipelines de gaz sont reconnus comme des indicateurs de fuite (les oiseaux sont attirés ici par les mercaptans, composés soufrés à l'odeur âcre que l'on ajoute au gaz inodore pour le détecter).

Mais les arguments essentiels à l'encontre d'un odorat développé pour un grand nombre d'espèces aviennes demeuraient ceux des neuro-anatomistes: les oiseaux étant tenus alors pour des vertébrés au cortex à peine ébauché, les zones corticales dévolues au traitement des

informations olfactives ne devaient occuper que peu de place. 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 espèces que les chercheurs se sont tournés il y a environ cinquante ans pour reposer le problème de l'olfaction des oiseaux.

Parmi lesdites espèces, des oiseaux de mer comme les pétrels, les albatros et autres puffins (procellariiformes) semblaient les meilleurs candidats à des aptitudes olfactives de haut niveau. Et nombre d'observations anciennes l'attestaient. Ainsi les baleiniers d'autrefois étaient-ils surpris de la vitesse à laquelle une nuée de pétrels surgissait autour du cadavre d'une baleine qui venait d'être tuée, vraisemblablement attirés par l'odeur.

Des expérimentations l'ont bien confirmé. En terre Adélie, Pierre Jouventin a soumis des pétrels des neiges à des épreuves à choix multiples, fondées sur l'emploi de récipients opaques et partiellement clos, qui contenaient ou non de la nourriture: les oiseaux se dirigeaient systématiquement vers ceux contenant du poisson. Finalement, chez certaines espèces marines, l'olfaction aurait été sélectionnée 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, où les odeurs se diffusent le mieux.

Au milieu des années 1990, un nouveau consensus régnait parmi les ornithologues : oui, certains oiseaux ont une vraie olfaction, mais seulement ceux dont la quête alimentaire s'effectue dans de (très) mauvaises conditions d'éclairage, ou qui recherchent surtout des proies dérobées à leur vue. Cette vision était bien trop restrictive...

En effet, à partir de 1996, des naturalistes anglo-saxons ont démontré le rôle central de l'odorat dans l'alimentation des poules domestiques ! Des expériences, portant sur des centaines de poulets, ont été menées à cette époque par deux biologistes anglais, Tim Roper et Nicola Marples. Ils ont confronté leurs sujets à trois situations successives. Un poulet découvre d'abord un récipient rempli d'une eau verte à l'odeur et au goût d'amande amère : quelques tentatives pour goûter le contenu suffisent à l'en détourner. Ensuite, le même volatile est placé devant une coupelle d'eau verte inodore qu'il boit alors sans problème. Enfin, confronté à de l'eau bleue à odeur d'amande amère, il s'en écarte immédiatement. Ces résultats éclairent notablement 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 (on parle de « signaux aposématiques ») que celles, apparentées, qui sont véritablement toxiques...

AVEC SON PARTENAIRE, EN SON LOGIS

Plus étonnant encore, chez beaucoup d'espèces aviennes, l'odorat interviendrait dans le choix des partenaires. À cet égard, une étude décisive, coordonnée en 2014 par Richard Wagner, de l'institut d'éthologie Konrad-Lorenz, à Vienne, a mis en évidence le rôle central de la glande uropygienne, dont la sécrétion huileuse intervient dans le toilettage des oiseaux. Plus

104



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.

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

précisément, chez les mouettes tridactyles d'Alaska, les composés uropygiens sécrétés sont caractéristiques des individus, engendrant des signatures olfactives. Plus l'odeur de l'un est distincte de celle de l'autre, plus leurs gènes du complexe majeur d'histocompatibilité (CMH, un ensemble multigénique au rôle immunitaire important) sont différents. Or les mâles et les femelles qui s'accouplent ont systématiquement des gènes CMH éloignés. Comme ils aiment à se reniffler, on suppose qu'ils «évaluent» ainsi la distance génétique grâce aux signatures olfactives pour éviter la consanguinité.

L'olfaction joue également un rôle 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 locales sélectionnent précisément des plantes aromatiques (dont la lavande et le calament) dont elles truffent leur 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 montré que l'olfaction intervient de façon décisive dans ce comportement.

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. 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 on obstrue les narines tubulaires de 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 et Anna Gagliardo, de l'université de Pise, ou encore Oliver Padget, de l'université d'Oxford, et ses collègues ont mis en évidence un phénomène encore plus étonnant: grands migrateurs, 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 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.

UNE « CARTE OLFACTIVE »

Mais les résultats les plus surprenants concernent sans doute le rôle possible de l'olfaction dans l'orientation du pigeon voyageur. On sait depuis longtemps que les repères visuels, la position du soleil ou les étoiles sont des indices importants, mais, à eux seuls, ils sont insuffisants pour expliquer l'assimilation par l'oiseau de trajets souvent très complexes.

Depuis les années 1980, on sait que la détection du champ magnétique terrestre intervient également. 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 des régions corticales spécifiques et à l'hippocampe, une « carte olfactive » de son voyage : cette dernière serait alimentée en informations par des stimuli olfactifs... si bien qu'au-delà de 50 kilomètres de distance du pigeonnier, les oiseaux auxquels 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, car la majorité des pigeons retrouvent moins aisément le bon chemin si l'on obture leur narine droite plutôt que la gauche.

L'étude de l'olfaction a ouvert un champ de recherche ornithologique entièrement nouveau. 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 investisseurs. 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 détriment de l'odorat a persisté durablement. Qui plus est, jusque dans les années 1980, le cerveau avien était vu 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 ! Les temps ont heureusement changé.



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.

— L'auteur —

> **Benoît Grison**
est enseignant-chercheur
de l'UFR Sciences et techniques
à l'université d'Orléans.

— À lire —

> **B. Grison**, *Les Portes de la perception animale*, Delachaux & Niestlé, 2021.

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

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

RENDEZ-VOUS

P. 108

EN IMAGE

UNE IMAGE QUI A RÉCEMMENT
FAIT L'ACTUALITÉ



P. 110

REBONDISSEMENTS

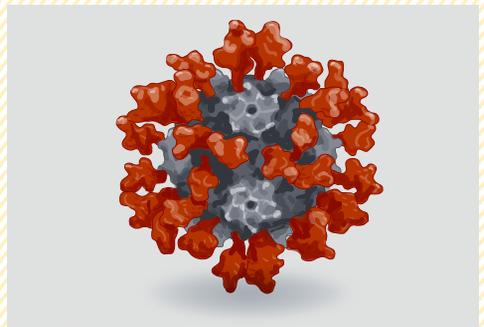
DES ACTUALITÉS SUR LES THÈMES
DES HORS-SÉRIES PRÉCÉDENTS



P. 116

INFOGRAPHIE

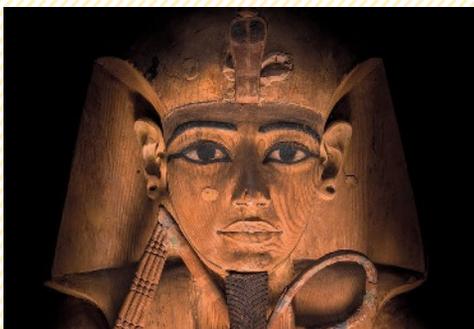
UN BON SCHÉMA VAUT
MIEUX QU'UN LONG DISCOURS



P. 118

LES INCONTOURNABLES

DES LIVRES, DES EXPOSITIONS,
DES FILMS... À NE PAS MANQUER



Souviens-toi, galaxie, que tu es poussière

Lancé en décembre 2021, le télescope spatial *James-Webb* a livré sa première image scientifique en juillet 2022.

Et depuis, la moisson ne cesse de s'enrichir de clichés tous aussi extraordinaires les uns que les autres. Parmi les plus récents, ceux que l'on doit à la collaboration *Phangs* (*Physics at high angular resolution in nearby galaxies*) montrent des galaxies proches, comme ici NGC 1365, située à environ 56 millions d'années-lumière de la Terre, dont l'instrument *Miri* (conçu pour les infrarouges moyens) a révélé la structure interne avec un luxe de détails jamais atteint.

On distingue un réseau hautement organisé de filaments de poussière et d'énormes bulles de gaz qui bordent les bras spiraux (*dans la partie supérieure, à gauche*): cet agencement semble être la conséquence de la libération d'énergie par de jeunes étoiles. Avec de telles images, les astronomes espèrent comprendre comment des processus à petite échelle (la formation des étoiles) influent sur l'évolution de plus grands objets, en l'occurrence, les galaxies.

Loïc Mangin

Le communiqué de presse de l'ESA:
<https://bit.ly/JWST-NGC1365>



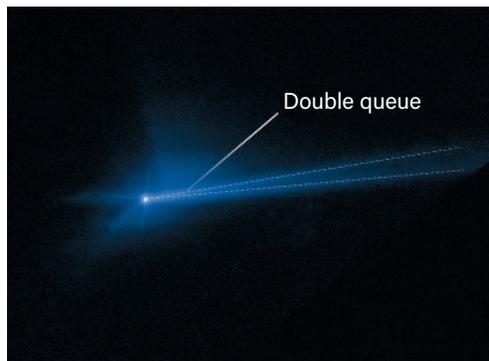
HORS-SÉRIE N° 118 : EXPLORATION SPATIALE

Les leçons de « Dart »

La mission « Dart », qui consistait à précipiter une sonde contre un astéroïde de façon à en modifier la trajectoire, fut un succès. Aujourd'hui, on en sait plus sur les détails de la collision et de ses effets.

Le 27 septembre 2022, à 1 h 14 du matin, heure de Paris, la sonde kamikaze *Dart* (pour *Double asteroid redirection test*), de la Nasa, s'est écrasée sur Dimorphos, un astéroïde en orbite autour de Didymos avec lequel il forme un système binaire, à plus de 11 millions de kilomètres de la Terre. L'objectif était de tester la faisabilité d'une mesure proposée pour protéger notre planète de la chute d'un éventuel astéroïde, qui consiste à dévier la trajectoire de l'objet. Plusieurs télescopes, dont *Hubble* et *James-Webb*, ainsi que le public ont suivi en direct l'événement décrit par le menu dans le *Hors-Série* n° 118, « Les nouveaux horizons de l'exploration spatiale ». Si les images avaient confirmé le succès de la mission, il restait à en connaître les détails.

C'est désormais chose faite avec pas moins de cinq études ! Quels en sont les faits saillants ? D'abord, deux méthodes indépendantes ont montré que la période de révolution de Dimorphos autour de Didymos, qui était auparavant de 11 heures et 55 minutes, a perdu 33 minutes. C'est beaucoup plus qu'attendu, et l'on en déduit que les éjectas, la matière expulsée par la sonde, ont largement contribué en s'éloignant (selon le principe d'action-réaction) à rapprocher les deux astéroïdes, cet effet ayant été quatre fois plus important que le seul impact de *Dart*. Qui plus est, ce dernier a eu lieu très près du centre de Dimorphos, à 25 mètres seulement, maximisant ainsi la force du choc. Dimorphos aurait perdu au moins 1 million de kilogrammes de roche



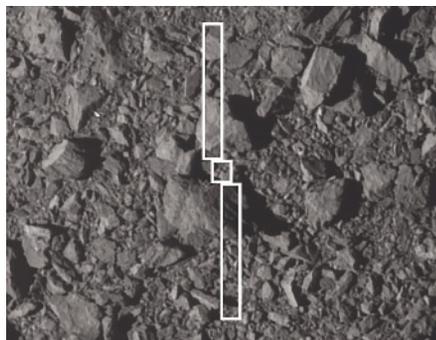
Quelques jours après l'impact de *Dart* sur Dimorphos, la « queue de comète » constituée de poussières s'est séparée en deux.

(sur une masse initiale de 4,3 milliards de kilogrammes), qui ont formé une traînée de plusieurs dizaines de milliers de kilomètres. Suivie pendant des semaines, notamment par le télescope *Hubble*, cette « queue de comète » s'est scindée en deux pendant quelques heures le 8 octobre sans que l'on sache encore bien l'expliquer. L'impact a transformé Dimorphos en un « astéroïde actif », c'est-à-dire un astéroïde à activité cométaire, car il relargue des poussières sous la forme d'une queue. On n'en connaît que quelques-uns, que l'on suppose nés de la collision entre deux blocs rocheux. La mission *Dart* offre une occasion d'étudier le phénomène. Mais le principal résultat reste que la Terre a désormais les moyens de se défendre contre un éventuel astéroïde qui mettrait en péril notre planète.

Loïc Mangin

C. Thomas *et al.*, R. Terik Daly *et al.*, J.-Y. Li *et al.*, A. Cheng *et al.*, A. Graykowski *et al.*, *Nature*, 2023.

110



La sonde *Dart* (en blanc, le tracé de sa silhouette) a heurté Dimorphos (ici vu trois secondes avant l'impact) entre deux blocs rocheux sur lesquels se sont fracassés les panneaux solaires (les deux rectangles blancs) de l'engin.

HORS-SÉRIE N° 116: HOMO SAPIENS

Le Mésolithique n'est pas une ère en toc

Dévoilée par les analyses scientifiques d'une équipe franco-polonaise, la méthode de fabrication d'une pointe vieille de 10 200 ans révèle tout le savoir-faire de nos ancêtres du Mésolithique.

La Préhistoire humaine est découpée en deux grands moments, le Paléolithique et le Néolithique, ainsi que le rappelait le *Hors-Série* n° 116, « Comment Homo est devenu sapiens ». Mais la lente transition entre les deux est décrite comme une ère à part entière, nommée Mésolithique, notamment définie par le maintien d'un mode de vie de chasseurs-cueilleurs avec une tendance à la sédentarité. Du point de vue des techniques, le Mésolithique est souvent regardé comme une régression par rapport au Paléolithique supérieur. Or l'analyse transdisciplinaire d'un artefact découvert dans une tourbière polonaise, sur le site de Krzyż 7, vient rappeler qu'il n'en est rien. L'objet, sans doute l'extrémité brisée d'une arme de chasse, est composé de plusieurs matériaux organiques miraculeusement préservés de la décomposition. On y trouve une pointe de 13 centimètres taillée dans un fragment d'os long, fixée au bois (du pin sylvestre) à ses deux extrémités par deux séries de ligatures végétales révélées

La pointe, emmanchée de travers, est recouverte d'un goudron de bouleau, ou brai.



par la radiographie aux rayons X. Os et bois ont été travaillés de façon expédiente, c'est-à-dire assez sommaire, suggérant un usage immédiat. Puis l'ensemble a été recouvert d'une couche noire, identifiée comme du brai, soit de l'écorce de bouleau savamment chauffée jusqu'à devenir assez liquide et très adhérente. Ce collage a permis non seulement de rendre les pièces solidaires, mais a de plus conféré à l'extrémité de l'arme une imperméabilité et corrigé une asymétrie qui aurait rendu le projectile peu aérodynamique. Les chasseurs du Mésolithique savaient donc façonner des outils composites, ingénieux et performants.

Olivier Voizeux

J. Kabaciński *et al.*, Expedient and efficient: An Early Mesolithic composite implement from Krzyż Wielkopolski, *Antiquity*, 2023.

HORS-SÉRIE N° 117: LES PÔLES

L'Antarctique, entre été et hiver

Aucune région du monde n'est épargnée par la hausse des températures, mais certaines sont plus touchées que d'autres. C'est le cas des zones polaires, et le *Hors-Série* n° 117 « Notre avenir se joue aux pôles » s'en faisait l'écho, ce qui se traduit par le recul des glaces dans ces régions. Pour mieux comprendre ce phénomène, Benjamin Wallis, de l'université de Leeds, en Grande-Bretagne, et son équipe se sont intéressés aux vitesses d'écoulement de 105 glaciers de la côte ouest de la péninsule Antarctique. L'analyse de plus de 10 000 images radar prises entre 2014 et 2021 par la mission *Copernicus Sentinel-1* a révélé que ces glaciers s'écoulaient en moyenne 12% plus vite en été qu'en hiver, cette accélération atteignant 22% pour certains. Ce différentiel au cours de l'année n'avait jamais été observé dans cette région, dont la glace, si elle fondait complètement, entraînerait une hausse de 7 centimètres du niveau marin. C'est une surprise, et Benjamin Wallis de préciser: « On connaissait la saisonnalité des glaciers du Groenland, on sait désormais qu'elle concerne aussi ceux de l'Antarctique. » Et d'insister sur la nécessité de prendre en compte cette périodicité dans les scénarios de réchauffement climatique.

L. M.

B. Wallis *et al.*, Widespread seasonal speed-up of west Antarctic Peninsula glaciers from 2014 to 2021, *Nature Geoscience*, 2023.

HORS-SÉRIE N° 115 : INTELLIGENCE ARTIFICIELLE

Cette IA sait compter les arbres un à un

Près de 10 milliards : tel est le nombre d'arbres d'Afrique subsaharienne sèche qu'une intelligence artificielle a été en mesure de compter. Une performance qui vient chambouler notre manière de surveiller l'état des forêts.



Même les arbres isolés (*ici, dans le Gourma malien*) sont détectés.

Nous l'avions constaté dans le *Hors-Série* n° 115 «Jusqu'où ira l'intelligence artificielle?», la reconnaissance d'images, par exemple en médecine, a fait des progrès prodigieux grâce à la technologie d'IA nommée «apprentissage profond». Compton Tucker, du centre spatial Goddard, de la Nasa, et ses collègues, notamment de l'université de Copenhague, du laboratoire Géosciences Environnement Toulouse, du CEA et d'Inrae, ont développé un nouvel usage que d'aucuns n'hésitent pas à qualifier de «révolutionnaire». De fait, couplé à l'imagerie satellite à haute résolution et au calcul haute performance, l'apprentissage profond a analysé, un à un, tous les arbres d'Afrique subsaharienne situés au-dessus de l'équateur et entre l'océan Atlantique et la mer Rouge. Grâce à des données de terrain, le modèle a été entraîné à identifier sur des photos satellites les arbres dont la couronne

dépasse 3 mètres carrés, puis il a été «lâché» sur 300 000 images satellites à haute résolution de la zone concernée. Au total, 9,9 milliards d'arbres ont été passés au peigne fin, chacun avec sa densité, sa couverture, sa taille, sa masse et le stock de carbone associé à chacune de ses parties (bois, feuilles et racines). Par rapport aux méthodes antérieures, celle-ci prend en compte beaucoup plus finement les arbres isolés, fréquents en milieu sec. Le gain en précision a d'ailleurs révélé que les modèles climatiques utilisés jusqu'à présent surévaluaient le stockage de carbone par les forêts dans cette partie de l'Afrique (un arbre engrange en moyenne 63 ou 98 kilogrammes de carbone, selon qu'il est en zone semi-aride ou plutôt humide). La base de données a été rendue publique,

au grand bonheur des scientifiques, des forestiers, mais aussi des agriculteurs, qui sont désormais en mesure de valoriser les stocks de carbone des arbres sur leurs terres. Au-delà, cette méthode puissante et novatrice devrait bouleverser le suivi des forêts du monde entier. La mesure de l'effet des sécheresses en sera facilitée, tout comme le suivi des politiques de reforestation ou à l'inverse la détection de la déforestation illégale, et cela à des échelles régionales mais aussi continentales – puisque la superficie africaine couverte par l'étude frise les 10 millions de kilomètres carrés, soit 18 fois celle de la France métropolitaine.

O. V.

C. Tucker *et al.*, Sub-continental-scale carbon stocks of individual trees in African drylands, *Nature*, 2023.

HORS-SÉRIE N° 117: LES PÔLES

Des baleines de plus en plus casanières

Le réchauffement climatique perturbe les migrations des baleines boréales, mettant en péril la sécurité alimentaire de certains peuples autochtones.



Une baleine boréale *Balaena mysticetus*, en Alaska.

114

La fonte des calottes polaires a de nombreuses conséquences, décrites dans le *Hors-Série* n° 117, « Notre avenir se joue aux pôles », sur le climat, le niveau des mers, la biodiversité, les modes de vie des peuples autochtones... Les travaux d'Angela Szesciorcka et de Kathleen Stafford, de l'université de l'Oregon, aux États-Unis, en apportent une nouvelle preuve: elle concerne l'une des quatre populations de baleines boréales *Balaena mysticetus* se répartissant autour du cercle Arctique, celle qui hante les mers des Tchouktches et, plus au sud, de Béring. C'est la moins menacée des quatre. D'ordinaire, les cétacés, qui atteignent parfois l'âge de 200 ans, passent l'été et l'automne dans le nord et migrent l'hiver en traversant le détroit de Béring, où l'Alaska et la Sibérie sont les plus proches. Lors de ce périple, ils suivent la glace de mer qui s'étend progressivement de l'Arctique vers le sud en hiver. De fait, ces animaux sont inféodés à cette glace qu'ils utiliseraient

comme protection (ce qui ne les empêche pas de la percer pour respirer grâce à leur tête massive) et pour améliorer, par des phénomènes de réflexion des ondes sonores, la communication entre individus, crucial quand on sait que cette espèce « chante » 24 heures sur 24 pendant cinq mois en hiver! Or, depuis une dizaine d'années, le réchauffement des températures a entraîné un déclin de la glace de mer: le détroit de Béring ne se referme presque plus pendant les mois d'hiver. Quelles conséquences sur les baleines boréales? Pour répondre, les deux biologistes ont utilisé les données de suivi (sur la base d'enregistrements sonores) de ces mammifères dans le sud de la mer des Tchouktches couvrant la période de 2009 à 2021. L'analyse confirme d'abord que les migrations sont bel et bien commandées par la formation de glace de mer. Ensuite, à partir de 2012-2013, certains cétacés ne franchissaient plus le détroit de Béring.

Ces modifications comportementales ont de multiples effets, notamment une compétition accrue pour les ressources alimentaires au sein de l'espèce mais aussi avec d'autres animaux, une augmentation des risques de collision avec les bateaux, toujours plus nombreux autour de l'Arctique, justement en raison du recul des glaces... Le mode de vie de certaines communautés autochtones est également bouleversé. Ainsi, Kathleen Stafford rappelle que « les baleines boréales sont chassées depuis deux millénaires par les peuples de l'Arctique, mais à l'automne 2019 aucune n'a été capturée par les chasseurs Inupiat (les Inuits d'Alaska), à Utqiagvik, sur les rives de la mer de Beaufort, tout au nord de l'État. » Et ce sont toutes leurs traditions culturelles, spirituelles... qui sont bouleversées.

L. M.

A. Szesciorcka et K. Stafford, Sea ice directs changes in bowhead whale phenology through the Bering Strait, *Movement Ecology*, 2023.

Vaincre[®]

LE CANCER

NOUVELLES RECHERCHES BIOMEDICALES

**PRENONS UNE LONGUEUR D'AVANCE SUR LE CANCER
QUI RESTE LA 1^{ÈRE} CAUSE DE MORTALITE PREMATUREE EN FRANCE**



Luc Ferry, Philosophe, écrivain, ancien Ministre de la Jeunesse, de l'Education Nationale et de la Recherche

Chaque année, 400.000 nouveaux cas de cancer, tout type confondu, sont dépistés.
Statistiquement, il y a un peu plus de 1000 nouveaux malades par jour,
parmi lesquels 600 vont guérir et 400 vont mourir.

AIDEZ NOS CHERCHEURS À SAUVER VOS VIES

VAINCRE LE CANCER - NRB

Hôpital Paul Brousse
12/14, avenue Paul Vaillant-Couturier
94800 VILLEJUIF
www.vaincrecancer-nrb.org
contact@vaincrecancer-nrb.org

Rejoignez le combat, donnez sur
vaincrecancer-nrb.org

SERVICE MÉCÉNAT

01 80 91 94 60

Coût d'un appel local

RETROUVEZ-NOUS SUR



Les animaux malades du... Covid-19

Outre les humains, le SARS-CoV-2 infecte d'autres espèces animales, et elles sont nombreuses. L'inventaire de la faune contaminée aidera à mieux préparer la prochaine pandémie.

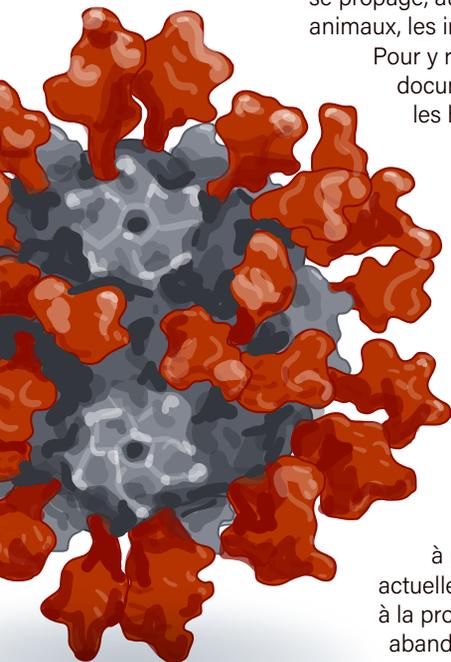
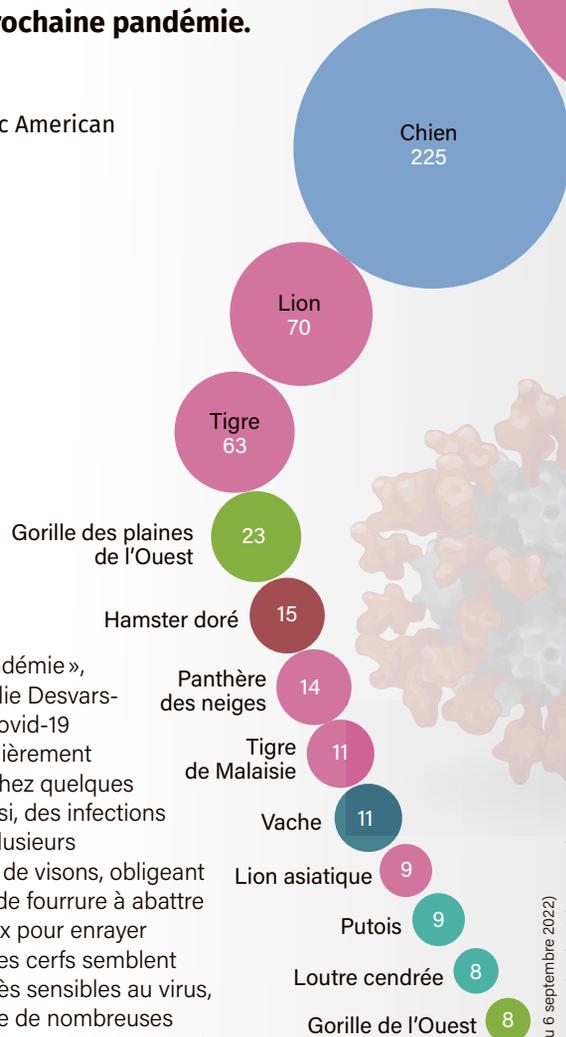
Megha Satyanarayana

Chef de la rubrique Opinion à Scientific American

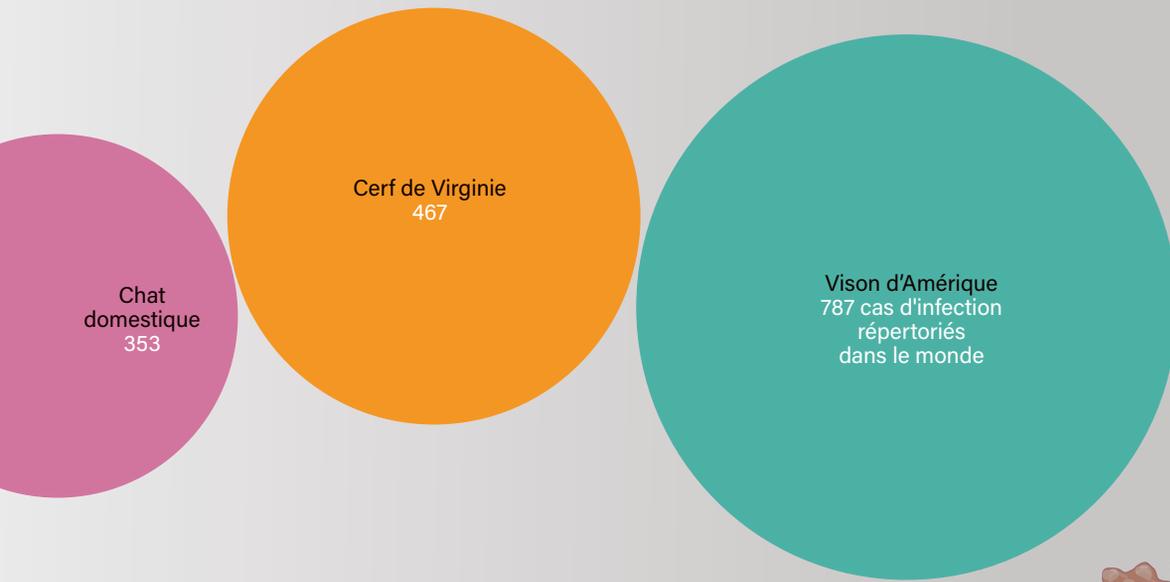
Le coronavirus du Covid-19 cible non seulement les êtres humains, mais aussi de nombreuses espèces différentes parmi lesquelles l'agent pathogène circule et même passe de l'une à l'autre. Or, explique Amélie Desvars-Larrive, de l'université de médecine vétérinaire de Vienne, en Autriche, autant chez l'humain, les scientifiques ont beaucoup appris sur la façon dont le SARS-CoV-2 se propage, autant chez les autres animaux, les informations sont rares.

Pour y remédier et mieux documenter les liens entre les humains, la faune et le virus, la chercheuse a réuni une équipe afin de rassembler en une base de données publique les rapports épars faisant état d'animaux infectés par le Covid-19 dans le monde entier. C'est important, car comprendre comment le virus se propage au sein des mammifères (aucune autre catégorie animale n'est concernée), humains et non humains, aidera à mieux gérer la pandémie actuelle et à nous préparer à la prochaine. « Nous devons abandonner le point de vue uniquement anthropocentrique

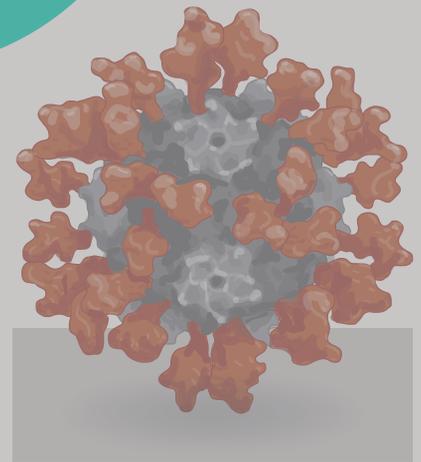
sur cette pandémie », résume Amélie Desvars-Larrive. Le Covid-19 a été particulièrement contagieux chez quelques espèces. Ainsi, des infections ont touché plusieurs exploitations de visons, obligeant les éleveurs de fourrure à abattre leurs animaux pour enrayer la maladie. Les cerfs semblent également très sensibles au virus, de même que de nombreuses espèces de chats, petits et grands. Selon Barbara Han, de l'institut Cary pour l'étude des écosystèmes, à Millbrook, aux États-Unis, au-delà du simple recensement des espèces infectées, disposer de ce type d'informations en un seul endroit facilitera les travaux sur le comportement et la dynamique du virus.



Infographie



- | | |
|--|---|
|  Mustelidae |  Cervidae |
|  Hyaenidae |  Felidae |
|  Hippopotamidae |  Canidae |
|  Trichechidae |  Hominidae |
|  Myrmecophagidae |  Cricetidae |
|  Callitrichidae |  Bovidae |
|  Viverridae |  Castoridae |
|  Cercopitheciidae |  Procyonidae |



117

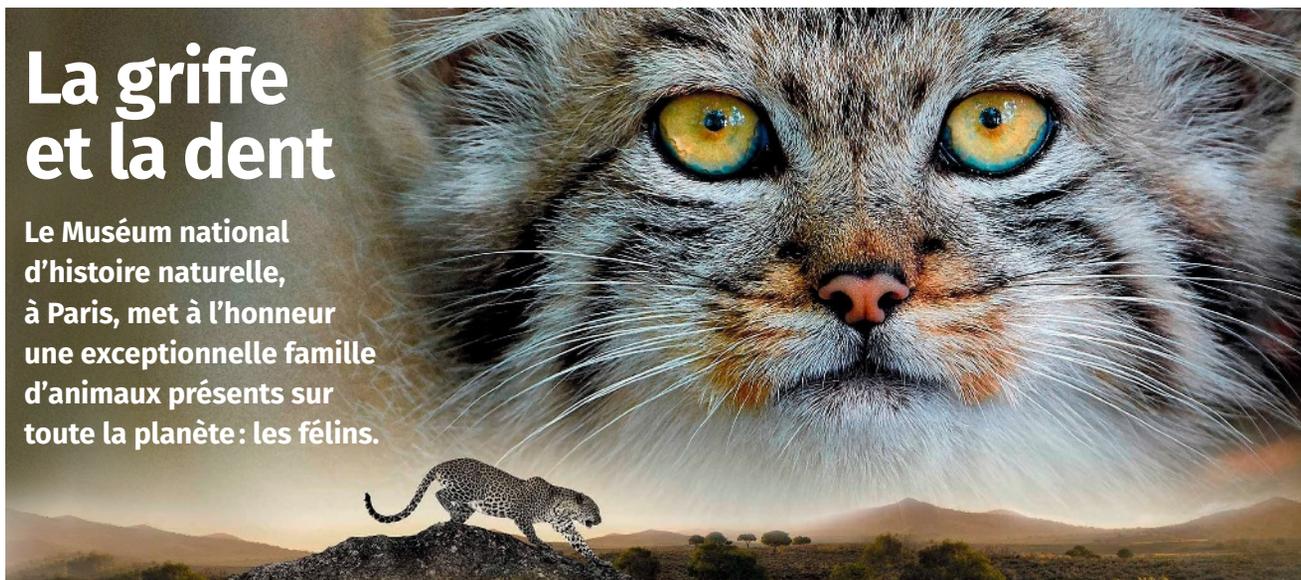
- 1 Mandrill
- 1 Binturong
- 1 Chat viverrin
- 1 Léopard
- 1 Lynx boréal
- 1 Lynx du Canada
- 1 Sapajou
- 1 Ouistiti mélanure
- 1 Tamanoir
- 2 Tigre de Sumatra
- 2 Cerf mulet
- 2 Lamantin des Caraïbes
- 2 Hippopotame
- 2 Hyène tachetée
- 3 Coati roux
- 3 Hamster (générique)
- 3 Puma
- 7 Castor d'Europe

La taille des cercles est proportionnelle au nombre de cas
La couleur indique les groupes taxinomiques

À VISITER

La griffe et la dent

Le Muséum national d'histoire naturelle, à Paris, met à l'honneur une exceptionnelle famille d'animaux présents sur toute la planète : les félins.



118

Seulement 38 et ce sont pourtant parmi les plus célèbres. Il ne s'agit pas des tableaux de Vermeer, mais des espèces de félins. De fait, à peine une quarantaine sur près de 6 500 mammifères connus, et une notoriété disproportionnée qui se traduit par une omniprésence dans les livres, les films, les cultures... Et l'on pense à l'Égypte ancienne qui vénérât les chats au point de les momifier par dizaines de milliers et de les inscrire à son panthéon sous les traits de la déesse protectrice Bastet. Conséquence de ce succès, les félins constituent l'une des familles d'animaux que le public pense connaître le mieux. Est-ce vraiment le cas ? Pour le savoir, le Muséum national d'histoire naturelle, à Paris, propose de les découvrir à travers une exposition d'envergure. Elle associe les connaissances scientifiques récentes sur ces animaux, des naturalisations

inédites de spécimens ainsi qu'une scénographie liant collections, films et jeux. Elle offre ainsi un panorama des plus exhaustifs de l'univers des félins avec, entre autres, plus de 100 spécimens et pièces anatomiques. Une première partie brosse un portrait de cette famille et place sous les projecteurs des animaux moins starisés que les lions et les tigres, comme le margay, le guigna, le chat de Temminck... Qui dit famille dit également ancêtres et cousins, dont le célèbre tigre à dents de sabre, disparu il y a 10 000 ans, et présenté dans l'exposition. Les dangers et menaces qui pèsent sur les fauves actuels ne sont pas oubliés. Dans une deuxième partie, le public est invité à découvrir les clés de leur succès évolutif : les qualités anatomiques, comportementales et sensorielles qui en font des prédateurs hors pair. Cependant, les félins ne sont pas les seuls prédateurs de notre planète.

En parallèle de l'exposition, le Parc zoologique de Paris propose une saison consacrée à cette catégorie. Lion, loup, certes, mais aussi oiseaux, insectes, poissons, serpents, grenouilles... et même étoiles de mer, les animaux qui chassent sont plus nombreux qu'on ne l'imagine. Retour à la Grande Galerie de l'évolution où vient ensuite un espace réservé aux liens entre félins et humains, qui, entre adoration et crainte, ont été tissés dans de nombreuses civilisations : Égypte, donc, mais aussi Grèce, Zambie, Kenya, Japon, Chine, Inde... Ces relations se prolongent dans la dernière partie traitant de la domestication, le chat étant l'animal de compagnie préféré des Français. Pas de doute, nous sommes félins pour l'autre...

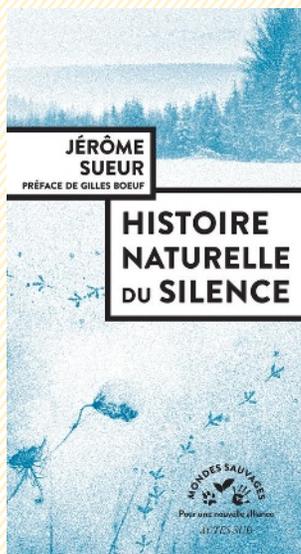
« Félins », jusqu'au 7 janvier 2024, à la Grande Galerie de l'évolution, au Muséum national d'histoire naturelle, à Paris. www.mnhn.fr/fr/expo-felins

À LIRE

« The sound of silence »

Découvrir la diversité sonore du monde sauvage pour mieux traquer ses silences et dénoncer les bruits qui menacent le vivant.

C hut... approchez votre oreille et écoutez. Ici, sur ce rocher émergé d'une côte, un petit picotement sonore. Ce sont des patelles, ces gastéropodes en forme de « chapeaux chinois » qui broutent des algues avec leur radula, une sorte de langue râpeuse. Là, un paon du jour, un papillon aux grands ocelles bleu et rouge, fait cliquer les nervures de ses ailes. Jérôme Sueur, du Muséum national d'histoire naturelle, à Paris, invite dans son ouvrage à tendre l'oreille et à découvrir la diversité des sons qui nous entourent. Et c'est tout un monde qui s'ouvre, qui se donne à entendre... une nouvelle fenêtre pour aborder l'étude du vivant. Ainsi le lecteur découvre la composante acoustique des niches écologiques, proposée par le bioacousticien américain Bernie Krause (à qui l'on doit l'exposition « Le grand orchestre des animaux », à la fondation Cartier, en 2017) : les espèces occupent un espace sonore qui leur est propre pour éviter la concurrence. Le prisme des sons devient une autre façon d'aborder la biodiversité à travers l'étude de paysages sonores qui en révèlent, tout autant que les inventaires, l'érosion. C'est que les humains ont débarqué et perturbé la symphonie du vivant avec leurs machines bruyantes et en réduisant au



silence nombre d'espèces. Parallèlement, ils se sont bouché les oreilles, ne prêtant plus attention aux sons de la nature. Pour quelles raisons ? « Probablement, selon l'auteur, car ils ne nous servent plus, car nous sommes plus de 80 % à être citadins et que les sons de la nature ne portent plus d'informations nécessaires au bon déroulé de nos vies modernes. » Il est temps de réapprendre à écouter, à s'arrêter, à fermer les yeux et se laisser envahir par le chant d'un oiseau, même en pleine ville, et d'apprécier le silence, si rare de nos jours, par exemple en montagne l'hiver. À bon entendeur...

Jérôme Sueur, *Histoire naturelle du silence*, Actes Sud, 272 pages, 22 euros, 2023.



À REGARDER

IA et chimie

Depuis fin novembre 2022, rares sont ceux qui ne se sont pas amusés avec ChatGPT3, l'intelligence artificielle conversationnelle d'OpenAI. C'est étonnant que nous sommes assurément entrés dans l'ère de l'IA, ces technologies infusant tous les domaines d'activité, des plus anodins de notre vie quotidienne jusqu'à ceux, complexes, du monde de la recherche. La chimie ne fait pas exception, et même si l'IA semble encore ignorée par beaucoup de chimistes. Partant de ce constat, la maison de la Chimie a récemment organisé un colloque sur le sujet et met à disposition les vidéos des diverses interventions. On y apprendra comment la *machine learning* accélère la découverte de nouvelles molécules thérapeutiques, voies de synthèse, alliages inédits..., bouleverse la parfumerie et offre de nouvelles approches méthodologiques pour la maîtrise des risques liés aux activités et produits industriels. Les promesses ne s'arrêtent pas là, car de cette alliance avec l'IA naîtrait une chimie durable au service de la transition écologique.

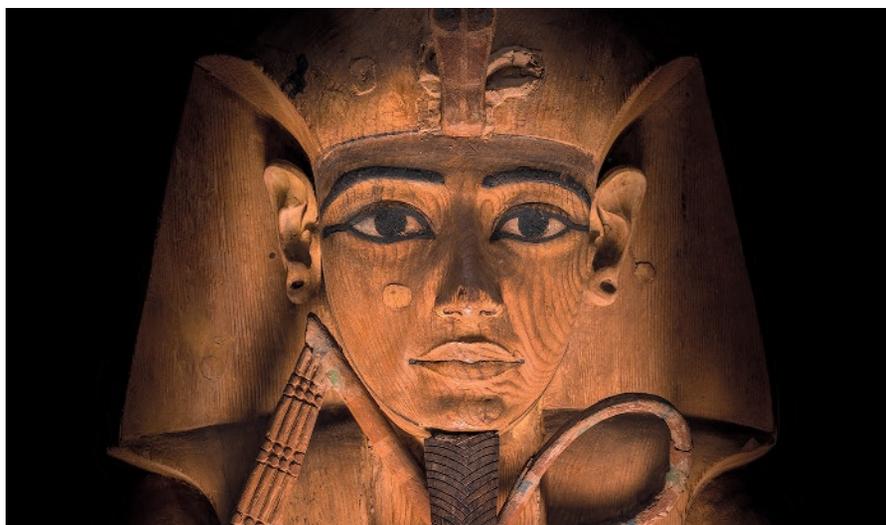
<https://bit.ly/ChimIA>

À VISITER

Ramsès le Grand, le pharaon soleil

Une exposition rassemblant près de 180 trésors de l'Égypte antique témoigne de la vie du plus célèbre des pharaons.

Demander à quiconque le nom d'un pharaon de l'Égypte ancienne, il y a fort à parier que Ramsès sera vite cité, aux côtés probablement de Toutankhamon et peut-être de Khéops. Entendons-nous, il s'agit du Ramsès deuxième du nom (ils furent 11 à le porter), troisième et dernier roi de la XIX^e dynastie, qui gouverna de 1279 à 1213 avant notre ère. Ce règne particulièrement long (soixante-six ans!), surtout pour l'époque, explique en partie sa postérité. Les nombreux monuments et temples, comme ceux d'Abou Simbel, qu'il fit construire, ainsi que les diverses batailles qu'il mena et remporta, par exemple contre les Hittites à Qadesh (dans l'actuelle Syrie) en - 1274 parachèvent le mythe et font du souverain égyptien, au regard d'un Occidental, l'égal d'un Louis XIV. Cela valait bien une exposition, en l'occurrence « Ramsès et l'or des Pharaons », présentée à la Grande Halle de la Villette et conçue en partenariat avec le Conseil supérieur des antiquités égyptiennes.



La première partie s'attache à détailler le règne de Ramsès II à travers diverses œuvres. Parmi elles, une tête de statue colossale en granodiorite montre le monarque coiffé d'une perruque à petites boucles et portant un diadème d'où se dresse le cobra (l'uraeus) qui protège le roi. Citons aussi un autre Ramsès II colossal, en calcaire, tenant dans ses mains le *mékès*, un cylindre abritant des papyrus. Coiffé du *némès* (une coiffe rayée uniquement portée par le roi), arborant la barbe postiche, il porte également un poignard glissé dans la ceinture de son pagne plissé. Cette statue immortalise l'image du pharaon par excellence.

La seconde partie de l'exposition est consacrée à la mort de Ramsès II et à sa postérité. Sa sépulture, dans la vallée des Rois, sur la rive

gauche du Nil au niveau de Louxor, fut pillée et plusieurs fois inondée, mais une partie de son trésor fut sauvée et réutilisée par ses successeurs, ce qui permet de montrer aujourd'hui une grande variété d'objets précieux, souvent en or, et explique le nom complet de l'exposition.

Enfin, le clou de cet événement est le cercueil de Ramsès II, en cèdre. Sa présence à Paris n'est pas une première. Il est venu accompagné de la royale momie en 1976 pour qu'elle soit « soignée » au musée de l'Homme et débarrassée des champignons qui l'avaient colonisée. La légende raconte qu'un passeport lui fut attribué à cette occasion.

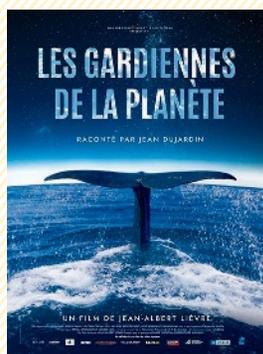
« Ramsès et l'or des pharaons », Grande Halle de la Villette, Paris, jusqu'au 6 septembre 2023.
<https://www.expo-ramses.com/lexposition>

À VOIR

Des géants aux nageoires d'argile

Un documentaire, par la grâce d'images rares, nous emmène dans le sillage de la société secrète des baleines, sans oublier d'alerter sur les dangers qui pèsent sur ces géants.

Une baleine à bosse s'est échouée sur une plage. Un groupe d'hommes, de femmes et d'enfants s'active pour la remettre à l'eau. Y parviendra-t-il? La réponse est la fin du documentaire que Jean-Albert Lièvre consacre à ces cétacés, ces citoyens des océans essentiels à l'écosystème de notre planète depuis plus de 50 millions d'années. Initié à l'univers du documentaire dans les combles du Muséum national d'histoire naturelle, l'auteur, après avoir travaillé pour l'émission « Ushuaia » plusieurs décennies durant, s'est lancé dans l'aventure des *Gardiennes de la planète*. Avec une équipe réduite, il a parcouru le monde, du Groenland à l'île Maurice, du Kamtchatka à l'Antarctique. Résultat? Des images exceptionnelles, comme celles de la chasse à la bulle, lorsque les baleines à bosse emprisonnent dans un « filet » en spirale



les bancs de krill avant de les ingurgiter. Ou bien celles, rares, de l'allaitement d'un bébé cachalot. Les séquences, montées avec un souci aussi pédagogique que poétique, composent un film au point de vue original: celui de la baleine. À travers la voix off, ici celle de Jean Dujardin, c'est elle qui se raconte. Et d'évoquer son inquiétude quant à son avenir tant les menaces, d'origine anthropique, pèsent sur elle. Aussi le documentaire a-t-il également pour mission d'alerter les spectateurs et de les guider vers plus d'informations, et de possibles actions concrètes à mener, auprès d'associations reconnues. Dans le même esprit, un dispositif à destination des écoliers et collégiens est mis en place autour du film et prévoit notamment deux kits pédagogiques publiés par Belin Éducation, l'un pour les classes de CM1 et CM2, l'autre pour celles de la sixième à la troisième. Un album documentaire jeunesse a aussi été tiré du film et est disponible en librairie.

www.gardiennesdelaplanete-lefilm.com

À LIRE

Une économie à la hauteur

« L'avidité d'une partie des humains est devenue préjudiciable à la poursuite de l'aventure de l'humanité. » C'est par ce constat qu'Éloi



Laurent, économiste, chercheur à l'Observatoire français des conjonctures économiques (OFCE) et professeur à Sciences Po, introduit son ouvrage destiné à donner les outils pour inverser la tendance. Le problème réside dans la disjonction entre systèmes sociaux et système naturels. Pour les reconnecter, il importe donc de réformer l'économie en profondeur. Selon l'auteur, elle doit partir de la biosphère plutôt que de la traiter comme une variable d'ajustement et placer en son centre la crise des inégalités sociales plutôt que l'obsession de la croissance. Dans son manuel radicalement innovant, l'auteur propose d'abord une méthode pour insérer l'économie entre réalité écologique et principes de justice, puis donne les clés pour mener à bien cette révolution. L'une d'elles consiste à offrir d'autres perspectives face aux récits dominants actuels, où l'emportent notamment le fatalisme et le « technologisme », afin de privilégier entre autres la coopération. Beau programme!

Éloi Laurent, *Économie pour le XXI^e siècle. Manuel des transitions justes*, La Découverte, 2023, 248 pages, 21 euros.

GROUPE POUR LA SCIENCE

Directrice des rédactions:
Cécile Lestienne

HORS-SÉRIE POUR LA SCIENCE

Rédacteur en chef adjoint: Loïc Mangin
Rédacteur en chef adjoint délégué: Olivier Voizeux

POUR LA SCIENCE

Rédacteur en chef: François Lassagne
Rédactrice en chef adjointe:
Marie-Neige Cordonnier
Rédacteurs: François Savatier et Sean Bailly

Développement numérique:
Philippe Ribeau-Gésippe

Community manager et partenariats:
Aëla Keryhuel
aela.keryhuel@pouurlascience.fr

Conception graphique:
Céline Lapert et Ingrid Leroy

Direction artistique: Céline Lapert
Maquette: Pauline Bilbault, Raphaël Queruel,
Ingrid Leroy et Ingrid Lhande

Révisseuses: Anne-Rozenn Jouble,
Isabelle Bouchery et Maud Bruguière

Responsable marketing: Frédéric-Alexandre Talec
Assistant administratif: Bilal El-Bohtori
Direction du personnel: Olivia Le Prévost

Fabrication:
Marianne Sigogne et Stéphanie Ho
Directeur de la publication et gérant:
Nicolas Bréon

WWW.POURLASCIENCE.FR

170 bis bd du Montparnasse
75014 Paris
Tél.: 01 55 42 84 00

PUBLICITÉ FRANCE

stephanie.jullien@pouurlascience.fr

ABONNEMENTS

Abonnement en ligne:
<https://boutique.groupepouurlascience.fr>
Courriel: serviceclients@groupepouurlascience.fr
Tél.: 01 86 70 01 76
Du lundi au vendredi de 9 h à 13 h

Adresse postale:
Service Abonnement - Groupe Pour la Science
235 avenue Le Jour se Lève
92100 Boulogne-Billancourt

Tarifs d'abonnement 1 an (12 numéros)

France métropolitaine: 59 euros
Europe: 71 euros
Reste du monde: 85,25 euros

DIFFUSION

Contact kiosques:
À Juste Titres ; Alicia Abadie
Tél.: 04 88 15 12 47

Information/modification
de service/réassort:
www.direct-editeurs.fr

SCIENTIFIC AMERICAN

Editor in chief: Laura Helmuth
President: Kimberley Lau

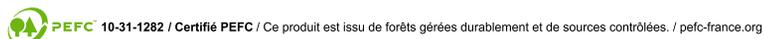
Toutes demandes d'autorisation de reproduire, pour le public français ou francophone, les textes, les photos, les dessins ou les documents contenus dans la revue « Pour la Science », dans la revue « Scientific American », dans les livres édités par « Pour la Science » doivent être adressées par écrit à « Pour la Science S.A.R.L. », 162 rue du Faubourg Saint-Denis, 75010 Paris.

© Pour la Science S.A.R.L. Tous droits de reproduction, de traduction, d'adaptation et de représentation réservés pour tous les pays. La marque et le nom commercial « Scientific American » sont la propriété de Scientific American, Inc. Licence accordée à « Pour la Science S.A.R.L. ».

En application de la loi du 11 mars 1957, il est interdit de reproduire intégralement ou partiellement la présente revue sans autorisation de l'éditeur ou du Centre français de l'exploitation du droit de copie (20 rue des Grands-Augustins, 75006 Paris).



Origine du papier: Finlande • Taux de fibres recyclées: 0 % • « Eutrophisation » ou « Impact sur l'eau »: P_{tot} 0,003 kg/t



L'OiseauMag

La revue nature de la LPO | Printemps 2023 | lpo.fr



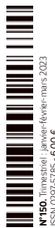
REFUGES LPO

Le hérisson
au jardin

BALADE

Dans les
marais
de Fouras

PRÉSUMÉS COUPABLES



PORTFOLIO

Concours
Photo
d'Oiseau
de l'année



REPORTAGE

Papouasie
occidentale,
royaume des
paradisiers



VOYAGE

Delta de
l'Okavango,
un fragile
paradis
sauvage

Abonnement
sur lpo.fr

05 46 82 12 31

Agir pour
la biodiversité



DOMAINE DE CHAUMONT-SUR-LOIRE CONVERSATIONS SOUS L'ARBRE



DOMAINE
DE CHAUMONT-SUR-LOIRE
CONVERSATIONS SOUS L'ARBRE

**UN NOUVEAU RENDEZ-VOUS MENSUEL
DE MARS À NOVEMBRE
POUR PENSER LA NATURE
AVEC DES INVITÉS EXCEPTIONNELS**

Venez écouter et discuter avec des personnalités de la culture, des arts et des sciences autour d'un thème. Une immersion de 2 jours, dans le confort vert d'un hôtel d'arts et de nature, pour une pensée ouverte aux autres et au monde.



27 et 28 avril :
Le beau est dans la nature

25 et 26 mai :
La résilience de la nature

29 et 30 juin :
L'histoire de l'eau

28 et 29 septembre :
Le merveilleux au cœur de la nature

26 et 27 octobre :
L'unité du vivant

23 et 24 novembre :
De l'importance des arbres

CONDITIONS TARIFAIRES ET RESERVATIONS

WWW.CONVERSATIONSSOUSLARBRE.FR - SEMINAIRE@DOMAINE-CHAUMONT.FR - 02 54 20 99 22