

POUR LA SCIENCE

Édition française de Scientific American

**COMPLÉTEZ VOTRE COLLECTION
DÈS MAINTENANT !**



N° 518 (Déc. 20)
réf. PL518



N° 517 (Nov. 20)
réf. PL517



N° 516 (Oct. 20)
réf. PL516



N° 515 (sept. 20)
réf. PL515



N° 514 (août 20)
réf. PL514



N° 513 (juill. 20)
réf. PL513



N° 512 (juin 20)
réf. PL512



N° 511 (mai 20)
réf. PL511



N° 510 (avril 20)
réf. PL510



N° 509 (mars 20)
réf. PL509



N° 508 (fév. 20)
réf. PL508



N° 507 (jan 20)
réf. PL507



À retourner accompagné de votre règlement à :

Pour la Science – Marketing – 170 bis boulevard du Montparnasse – 75 014 Paris – email : boutique@pouurlascience.fr



OUI, je commande des numéros de Pour la Science, au tarif unitaire de 9,90 €.

1 / JE REPORTE CI-DESSOUS LES RÉFÉRENCES à 5 chiffres correspondant aux numéros commandés :

1^{re} réf. _____ 01 x 9,90 € = 9,90 €
 2^e réf. _____ x 9,90 € = _____ €
 3^e réf. _____ x 9,90 € = _____ €
 4^e réf. _____ x 9,90 € = _____ €
 5^e réf. _____ x 9,90 € = _____ €
 6^e réf. _____ x 9,90 € = _____ €

TOTAL À RÉGLER _____ €

Groupe Pour la Science – Siège social : 170 bis, boulevard du Montparnasse, CS20012, 75680 Paris Cedex 14 – Sarl au capital de 32000 € – RCS Paris B 311 797 393 – Siret : 311 797 393 000 23 – APE 5814 Z

Offre valable jusqu'au 31/12/2021 en France Métropolitaine uniquement. Pour l'export, rendez-vous sur notre site internet boutique.pouurlascience.fr. Les prix affichés incluent les frais de port et les frais logistiques. Les informations que nous collectons dans ce bulletin d'abonnement nous aident à personnaliser et à améliorer les services que nous vous proposons. Nous les utiliserons pour gérer votre accès à l'intégralité de nos services, traiter vos commandes et paiements, et vous faire part notamment par newsletters de nos offres commerciales moyennant le respect de vos choix en la matière. Le responsable du traitement est la société Pour la Science. Vos données personnelles ne seront pas conservées au-delà de la durée nécessaire à la finalité de leur traitement. Pour la Science ne commercialise ni ne loue vos données à caractère personnel à des tiers. Les données collectées sont exclusivement destinées à Pour la Science. Nous vous invitons à prendre connaissance de notre charte de protection des données personnelles à l'adresse suivante : <https://rebrand.ly/charte-donnees-pls>. Conformément à la réglementation applicable (et notamment au Règlement 2016/679/UE dit « RGPD ») vous disposez des droits d'accès, de rectification, d'opposition, d'effacement, à la portabilité et à la limitation de vos données personnelles. Pour exercer ces droits (ou nous poser toute question concernant le traitement de vos données personnelles), vous pouvez nous contacter par courriel à l'adresse protection-donnees@pouurlascience.fr.

2 / J'INDIQUE MES COORDONNÉES

☐ M. ☐ Mme

Nom : _____

Prénom : _____

Adresse : _____

Code postal _____ Ville : _____

Téléphone _____

J'accepte de recevoir les offres de Pour la Science ☐ OUI ☐ NON

3 / JE CHOISIS MON MODE DE RÈGLEMENT

☐ Par chèque à l'ordre de Pour la Science

☐ Carte bancaire

N° _____

Date d'expiration _____

Clé (les 3 chiffres au dos de votre CB) _____

Signature obligatoire :



**RETROUVEZ TOUS LES ANCIENS NUMÉROS SUR
BOUTIQUE.POURLASCIENCE.FR**

L'AUTEUR



HERVÉ LE GUYADER
professeur émérite de biologie
évolutive à Sorbonne Université,
à Paris

COMMENT LES THÉROPODES PERDENT LEURS DOIGTS

La découverte d'«*Oksoko avarsan*», un dinosaure proche parent des oiseaux muni de seulement deux doigts fonctionnels, ravive la question de la perte des doigts chez les dinosaures théropodes.

À la fin du Crétacé, il y a environ 70 millions d'années, loin d'être un désert, l'actuel Gobi, en Mongolie, arborait cours d'eau, lacs et denses forêts de conifères, et était peuplé d'une étonnante diversité de dinosaures, en particulier d'oviraptorosaures. Ces théropodes bipèdes sont les plus proches parents des paraves, les oiseaux au sens large (dont le vélociraptor), parmi lesquels les oiseaux (aves) sont les seuls théropodes actuels. C'est ce qui fait l'intérêt exceptionnel des oviraptorosaures. De fait, depuis une vingtaine d'années, de nombreuses découvertes de fossiles remarquablement conservés de ces animaux ont permis aux paléontologues de brosser la dynamique évolutive de la transition de théropodes terrestres à des théropodes volants: origine des plumes, changement du squelette et de la musculature et... réduction du nombre de doigts.

La réduction du nombre de doigts du membre antérieur des théropodes est

bien connue: de cinq doigts, comme chez les crocodiles, on passe à quatre, puis à trois, comme chez les oiseaux actuels. Une telle perte est adaptative, car elle réduit la masse de l'extrémité du membre et, par conséquent, son moment d'inertie, ce qui facilite le vol, la surface alaire étant réalisée par des plumes très légères. Toutefois, on est encore loin de comprendre comment cette perte s'est produite. La découverte d'un nouvel oviraptorosaure, nommé *Oksoko avarsan*, dans la couche géologique du Crétacé terminal de Mongolie vient cependant de raviver cette question.

La main de l'animal présente en effet une originalité: elle n'a plus que deux doigts fonctionnels, munis de griffes, avec un troisième doigt vestigial. Le clade des oviraptorosaures est très diversifié, et les animaux montrent une grande variété dans la longueur et la morphologie du membre antérieur, ce qui suggère des variations dans sa fonction: fourrageage, couvaison, parade... Mais *O. avarsan* est le seul connu dont ce membre n'est muni



Le terme *Oksoko* se réfère à l'aigle à trois têtes de la mythologie altaïque. Le mot *avarsan*, lui, signifie «sauvé» en mongol et rappelle que ces trois spécimens ont été confisqués à des contrebandiers par l'Agence de renseignements mongole avant d'être confiés au Centre de paléontologie mongol en 2006. Alors seulement leur étude a pu commencer...



Hervé Le Guyader
a récemment publié:
**Biodiversité, le pari
de l'espoir,**
(Le Pommier, 2020).

Exhumés ensemble, les trois spécimens juvéniles qui ont permis de décrire cette nouvelle espèce vivaient en Mongolie il y a plus de 68 millions d'années.

Ces dinosaures à plumes arboraient un large bec dépourvu de dents ressemblant à celui d'un perroquet.



EN CHIFFRES

9

Neuf genres d'oviraptorosaures ont été découverts en Mongolie, dans le désert de Gobi.

175 MILLIONS D'ANNÉES

C'est l'âge de l'ancêtre commun le plus récent entre les oviraptorosaures et les paraves, les oiseaux au sens large.

2

Si l'autruche a trois doigts à son aile, elle n'en a que deux à sa patte postérieure. En revanche, l'émeu, un autre oiseau coureur, n'a qu'un doigt à l'aile et trois à la patte postérieure. Quant au crocodile du Nil, s'il a cinq doigts à sa patte antérieure, il n'en a que quatre à sa patte postérieure...

L'embryologie complète l'étude anatomique du membre et l'on connaît même des gènes clés de leur développement. C'est ainsi qu'en 2013, l'équipe de Michael Richardson, de l'université de Leyde, aux Pays-Bas, a mené une étude approfondie sur cinq oiseaux – deux oiseaux coureurs, l'émeu d'Australie et l'autruche d'Afrique, et trois oiseaux volants, le poulet, la tourterelle rieuse et le diamant mandarin – et un cousin des dinosaures, le crocodile du Nil, comme référence (voir l'encadré page 94).

L'ENSEIGNEMENT DE L'ÉMEU, L'AUTRUCHE ET LE DIAMANT MANDARIN

Le crocodile a cinq doigts à la patte antérieure, l'émeu un seul et les autres trois. On peut s'étonner de la différence entre l'autruche et l'émeu (rappelons qu'ils avaient des ancêtres volants). Or si ce dernier n'utilise ses ailes que pour la régulation thermique en les agitant comme un éventail, l'autruche s'en sert aussi lors des parades nuptiales, pour la couvaison et comme stabilisateurs dans des manœuvres en pleine course, telles que des zigzags ou des freinages rapides. Une sélection forte s'applique donc sur de telles ailes, à la différence de celles de l'émeu, et empêche ainsi leur atrophie.

L'équipe a eu l'idée de comparer le squelette de l'adulte avec un stade précoce de développement, quand la main n'est encore qu'une palette où l'on distingue les ébauches cartilagineuses des doigts, mais aussi l'expression de certains ➤

que de deux doigts fonctionnels. L'équipe internationale qui a décrit l'animal, rassemblée autour de Philip Currie, de l'université de l'Alberta, au Canada, évoque une nouvelle niche écologique pour cet animal, ce qui suggère une sélection. La comparaison avec d'autres théropodes, en tenant compte également du crâne et du bec, a amené ces chercheurs à suggérer qu'*O. avarsan* était strictement herbivore, ce qui rendait les griffes moins indispensables, d'où la perte d'un doigt. Mais comment aller plus loin sans connaître avec précision la fonction d'un tel membre? En s'intéressant... aux oiseaux eux-mêmes.

L'intérêt des oiseaux est multiple. On y rencontre des cas de perte de doigts, dont la fonction peut être décrite.



Oksoko avarsan

Taille: env. 1,20 m
(env. 2 m à l'âge adulte)
Poids: env. 45 kg
(env. 74 kg à l'âge adulte)

> gènes de développement, tel le gène *Sox9*, dont le produit contrôle l'expression spécifique du gène de collagène de type II dans les chondrocytes, les cellules du cartilage. Seules les cellules exprimant *Sox9* produisent cette protéine. L'équipe a ainsi découvert que le plan de la main de l'embryon est bien plus complet que celui de l'adulte. Prenons le cas de l'aile de l'autruche. On distingue non pas trois ébauches cartilagineuses exprimant *Sox9*, mais cinq. Puis les ébauches des doigts I (le pouce, ou doigt le plus antérieur) et V (le plus postérieur) régressent, et seules les ébauches II, III et IV iront à terme. En d'autres termes, l'expression de *Sox9* peut persister alors que les doigts correspondants sont perdus.

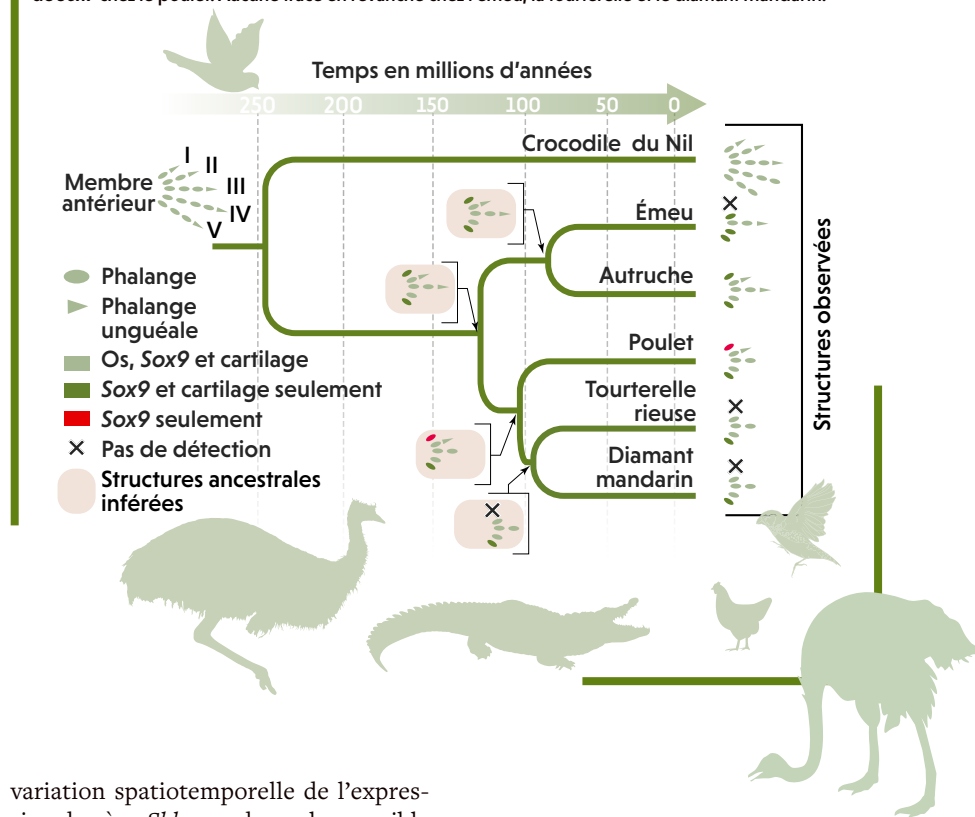
Focalisons-nous sur les doigts V et I. Tous les oiseaux adultes ont perdu le doigt V. Néanmoins, tous les embryons développent, à sa position, une ébauche transitoire exprimant *Sox9*, qui évolue en cartilage. Cela est également vrai pour le membre postérieur, et, si l'on se réfère à la phylogénie et la paléontologie, les voies génétiques du développement du cartilage du doigt V ont persisté pendant plus de 25 millions d'années après que le doigt V a disparu de la patte postérieure. Le doigt I, lui, a disparu de toutes les ailes depuis 120 millions d'années. Mais les voies génétiques sous-jacentes parfois aussi, et ce dans deux lignées indépendantes (les oiseaux coureurs et les oiseaux volants). Comment expliquer une telle différence ?

UNE CONTRAINTÉ DÉVELOPPEMENTALE

D'un point de vue embryologique, les doigts I et V ne sont pas en situation identique. En effet, le bourgeon du membre présente, dans sa partie postérieure, une aire appelée « zone d'activité polarisante » ou ZPA, qui envoie les signaux permettant à ce dernier de se développer suivant un axe antéropostérieur. Ainsi, le doigt V est proche de la ZPA, le doigt I en est le plus éloigné. Or la ZPA exprime le gène *Shh*, dont le produit est une protéine « morphogène » : elle diffuse dans les tissus et, selon sa concentration, active des cellules en activant *Sox9*. Cette voie est très conservée, l'évolution ne jouant que sur le caractère spatiotemporel de l'expression. Or, par diffusion, la protéine se retrouve en grande concentration près de la ZPA, donc vers le doigt V, et en faible concentration dans la partie antérieure du bourgeon, où seront situées les ébauches des doigts I et II. Une légère

QUAND LES DOIGTS DES OISEAUX ONT DISPARU

En combinant observations, phylogénie et paléontologie, l'équipe de Michael Richardson a reconstitué l'évolution des pertes de doigts de l'aile. Tous les oiseaux adultes ont perdu le doigt V, mais leurs embryons (ci-dessous la structure des mains au stade final du développement) en développent une ébauche transitoire exprimant le gène *Sox9* et produisant du cartilage. Le doigt I, lui, est représenté par un cartilage diffus chez l'autruche et une faible expression de *Sox9* chez le poulet. Aucune trace en revanche chez l'émeu, la tourterelle et le diamant mandarin.



variation spatiotemporelle de l'expression du gène *Shh* sera donc plus sensible dans les endroits les plus éloignés de la ZPA. En d'autres termes, les contraintes développementales ne sont pas les mêmes pour une ébauche proche ou éloignée de la ZPA.

Ainsi, la disparition des doigts des oiseaux se fait suivant deux pressions : une contrainte développementale et une sélection liée aux fonctions. Il est vraisemblable que la disparition du doigt chez *O. avarsan* relève d'un scénario analogue. En effet, on peut postuler que la pression de sélection sur les pattes antérieures se relâche, étant donné que la présence de doigts griffus ne paraît plus indispensable pour un animal qui n'a plus de proies à saisir. Mais est-ce le même mécanisme que celui décrit pour les oiseaux ? Vu la proximité évolutive des animaux, un biologiste postulera une identité des mécanismes évolutifs, ce qu'on appelle « un parallélisme ». Mais comment le démontrer ? Nous touchons la limite de la paléontologie. ■

BIBLIOGRAPHIE

G. F. Funston et al., **A new two-fingered dinosaur sheds light on the radiation of Oviraptorosauria**, *R. Soc. Open Sci.*, vol. 7(10), article 201184, 2020.

K. Kawahata et al., **Evolution of the avian digital pattern**, *Scientific Reports*, vol. 9, article 8560, 2019.

M. A. G. de Bakker et al., **Digit loss in archosaur evolution and the interplay between selection and constraints**, *Nature*, vol. 500, pp. 445-448, 2013.

L'UNIVERS AVANT LE BIG BANG

- 7 dossiers rédigés par des chercheurs et des experts sur le sujet
- Une lecture adaptée sur écrans

3,99 €



Les *Thema* sont une collection de hors-séries numériques. Chaque numéro contient une sélection des meilleurs articles publiés dans *Pour la Science* sur une thématique.

Dans la collection *Thema* découvrez aussi



**Commandez et téléchargez
les numéros en pdf**



Pour lire votre numéro, rendez-vous dans votre compte client



boutique.pourlascience.fr/tous-les-numeros/thema.html