

ABONNEZ-VOUS À **POUR LA SCIENCE**

**OFFRE
SPÉCIALE
NOUVELLE
FORMULE**

FORMULE
INTÉGRALE
-46%



99€

FORMULE
PASSION
-36%



79€

FORMULE
DÉCOUVERTE
-25%



59€

AVEC VOTRE ABONNEMENT INTÉGRALE OU PASSION LE DVD "LE MYSTÈRE ETTORE MAJORANA, UN PHYSICIEN ABSOLU"

Ettore Majorana, un jeune physicien, théoricien fulgurant, disparaît mystérieusement le 28 mars 1938 à bord d'un navire. Son corps n'a jamais été retrouvé. De nombreuses hypothèses ont été émises sur sa disparition : il se serait suicidé ou même aurait été enlevé par les nazis... Le mystère reste entier. Etienne Klein, physicien renommé, directeur de recherche au CEA, part sur les traces de Majorana. Son histoire permet-elle de percer le secret de sa disparition ?

"(Un) passionnant récit (...). La grande force du film est d'être à la fois pédagogique et personnel" **Télérama**



BULLETIN D'ABONNEMENT

À renvoyer accompagné de votre règlement à : Pour la Science - Service abonnements - 19 rue de l'industrie - BP 90 053 - 67 402 Illkirch cedex

☐ OUI, JE M'ABONNE À **POUR LA SCIENCE** POUR 1 AN,
JE CHOISIS MA FORMULE CI-DESSOUS :

☐ FORMULE **INTÉGRALE**

12 n° de *Pour la Science*
+ 4 Hors-Séries
+ Accès illimité aux archives en ligne depuis 1996
+ Le DVD "Le Mystère Ettore Majorana"

11A99EK3

99€
Au lieu de 183,44€*

☐ FORMULE **PASSION**

12 n° de *Pour la Science*
+ 4 Hors-Séries
+ Le DVD "Le Mystère Ettore Majorana"

PIA79EK1

79€
Au lieu de 123,44€*

☐ FORMULE **DÉCOUVERTE**

12 n° de *Pour la Science*

D1A59E

59€
Au lieu de 78,45€*

J'INDIQUE MES COORDONNÉES

☐ M. ☐ Mme

Nom : _____ Prénom : _____

Adresse : _____

Code postal : _____ Ville : _____

Téléphone : _____

• Mon e-mail : (à remplir en majuscule) _____
@ _____

J'accepte de recevoir les informations de *Pour la Science* ☐ OUI ☐ NON
et de ses partenaires ☐ OUI ☐ NON

• Je choisis mon mode de règlement :

☐ Par chèque à l'ordre de *Pour la Science*

☐ Par carte bancaire

N° _____

Date d'expiration : _____ Clé (Les 3 chiffres au dos de votre CB) : _____

Signature obligatoire

* Par rapport au prix de vente en kiosque, l'accès numérique aux archives et la valeur du DVD. Vous pouvez également si vous le souhaitez acquérir séparément le DVD "Le mystère Ettore Majorana" au prix de 14,99€, chaque n° de *Pour la Science* au tarif de 6,50€, notre n° spécial au tarif de 6,95€ et nos hors-séries au tarif de 7,50€. Délai de livraison : dans le mois suivant l'enregistrement de votre règlement. Offre réservée aux nouveaux abonnés, valable jusqu'au 31/12/2017 en France métropolitaine uniquement et dans la limite des stocks disponibles. Pour un abonnement à l'étranger, merci de consulter notre site www.pourlascience.fr. Conformément à la loi "Informatique et libertés" du 6 janvier 1978, vous disposez d'un droit d'accès et de rectification aux données vous concernant en adressant un courrier à *Pour la Science*. Photos non contractuelles.

L'ESSENTIEL

> Les paléontologues ont longtemps jugé impossible la restitution des couleurs des animaux fossiles, notamment les dinosaures.

> La découverte de pigments bien conservés dans une série de dinosaures change la donne.

> En étudiant ces pigments, les chercheurs parviennent à déduire quelles étaient les couleurs de ces dinosaures.

> Les motifs qu'arbore la robe de certains dinosaures livrent des informations sur le comportement et l'habitat de ces animaux.

Octobre 2006, université Yale, États-Unis. Installé devant un microscope électronique dans une pièce sombre, j'observe l'encre fossilisée d'un calmar de 200 millions d'années d'âge. Une mer de billes translucides d'un cinquième de micromètre de diamètre environ s'offre à ma vue. D'apparence banale pour l'œil non averti, elles me fascinent car elles ressemblent à des grains de mélanine, le pigment qui colore l'encre des céphalopodes actuels.

Peut-être n'aurais-je pas dû être si surpris, puisque des granules d'encre fossile avaient été découverts deux ou trois ans auparavant. Mais les voir de mes propres yeux changeait tout. Après cette expérience, j'ai examiné des fossiles de céphalopodes de diverses époques et lieux, et je me suis rendu compte que leur encre, parfaitement conservée pendant des centaines de millions d'années, était restée identique à elle-même.

Je me suis donc demandé si la mélanine pouvait se préserver aussi dans les fossiles d'autres types d'organismes que les céphalopodes. La mélanine est un pigment qui colore les cheveux, la peau, les plumes et les yeux. Elle peut produire des teintes rouges, brunes, grises et noires, éventuellement accompagnées de reflets métalliques, comme sur les ailes des corbeaux. Je me disais ainsi qu'en trouvant de la mélanine dans les fossiles d'animaux disparus, notamment de dinosaures, je pourrais peut-être restituer leurs couleurs.

Les paléontologues pensaient cependant que les pigments résistent difficilement à la fossilisation. Les quelques exemples de pigments conservés au sein de fossiles concernaient tous des invertébrés, mais jamais de vertébrés. Les chercheurs ne pouvaient donc >

L'AUTEUR



JAKOB VINTHER
biologiste, enseigne
à l'université
de Bristol, en Angleterre



LE DINOSAURE PSITTACOSAURUS

La couleur rouge du cou de ce dinosaure a été déduite de la forme et de la répartition de ses mélanosomes fossiles, les organites cellulaires qui fabriquent la mélanine, un pigment.

© Greg Ruth



Les vraies couleurs des dinosaures

VERT REPTILE, LES DINOSAURES ? PAS SEULEMENT : ROUGE, NOIR, CHATOYANT, BLANC, FAUVE... LES PIGMENTS FOSSILES NOUS RÉVÈLENT UNE PALETTE BIEN PLUS DIVERSE QU'ON NE LE PENSAIT.

> que s'inspirer des robes des animaux actuels pour essayer de deviner les couleurs des animaux disparus. En conséquence, les restitutions des robes de dinosaures sont très variables: certaines sont d'un ton terreux rappelant celui des reptiles et amphibiens; d'autres portent les teintes éclatantes des dinosaures actuels, c'est-à-dire des oiseaux.

Toutefois, d'autres chercheurs et moi avons fait au cours des onze dernières années une série de découvertes, qui réduisent les doutes dans la reconstitution des robes (ou des plumages) de dinosaures. Nous sommes en effet parvenus à mettre en évidence des structures porteuses de mélanine dans des dizaines de fossiles. En étudiant leurs formes et leur organisation, nous avons pu déduire les couleurs et les motifs qui ornaient des dinosaures et plusieurs autres espèces animales éteintes. Et ces informations ont livré d'intéressants indices sur le comportement et l'habitat de ces organismes.

MÉLANINE RÉSISTANTE À LA FOSSILISATION

Quel a été notre cheminement? Après avoir lancé l'idée que la mélanine d'organismes vertébrés, comme celle des céphalopodes, avait très bien pu résister à la fossilisation, il me fallait la mettre à l'épreuve. Pour ce faire, je devais trouver des fossiles présentant des taches sombres dans les régions du corps susceptibles de contenir de la mélanine: les phanères (plumes, poils...) et les yeux. Et il me fallait pouvoir examiner ces zones sombres au microscope électronique, ce qui nécessite parfois de prélever sur le fossile un échantillon assez petit pour rentrer dans l'appareil. Or les fossiles bien conservés sont rares et jalousement protégés par les muséums...

Heureusement, la formation de Fur Ølst, au Danemark, a livré de nombreux fossiles datant de l'Yprésien (56 à 47,8 millions d'années) extrêmement bien conservés. Ce remarquable gisement de mon pays natal allait me permettre de tester mon idée. J'ai pu convaincre le conservateur des fossiles de vertébrés du Muséum géologique de Copenhague de découper dans un bloc de calcaire contenant le fossile d'un petit oiseau un échantillon ayant les dimensions d'une tranche de pain. C'était nécessaire pour que l'on puisse placer sous le faisceau du microscope électronique ce fossile, qui présentait des taches au niveau des yeux et des impressions de plumes.

J'avais une assez bonne idée de ce qu'il fallait rechercher. J'avais lu de nombreux articles pour savoir comment la mélanine se présente dans les plumes des oiseaux actuels. Ce pigment est synthétisé au sein de cellules spécialisées, nommées mélanocytes, par des organites dédiés – les mélanosomes. Il reste en général enfermé dans ces organites longs

FOSSILE DE *PSITTACOSAURUS*

Des restes de peau entourent toujours son squelette. Ils semblent plus colorés sur le haut du corps (dos) que sur le bas (ventre).



de 0,5 à 2 micromètres et dont il existe deux formes. La première, cylindrique, produit la variante de la mélanine nommée eumélanine, qui absorbe la lumière de toutes les longueurs d'onde (y compris les ultraviolets). C'est l'eumélanine qui confère sa couleur noire à l'encre du calmar et aux plumes du corbeau. La seconde forme de mélanosome est globulaire. Elle produit la phéomélanine, variante de mélanine qui donne une couleur rouille. L'absence de pigments sur les plumes se traduit par une couleur blanche. Quant aux couleurs grises et brunes observées parfois, elles résultent de combinaisons de zones riches en eumélanine et phéomélanine et de zones dépourvues de pigments.

J'avais aussi consulté l'un des plus grands spécialistes de la couleur des oiseaux: Richard Prum, de l'université Yale. Comme le cas de l'encre fossile prouvait que l'eumélanine peut se conserver, j'ai pensé qu'il me fallait rechercher d'abord ce pigment dans les plumes. En discutant avec Richard Prum et Vinod

Saranathan, son doctorant d'alors, j'ai appris que les mélanosomes cylindriques sont disposés d'une façon caractéristique le long des barbes et des barbules dont la plume est constituée. C'est au cours du développement que les kératinocytes (les cellules spécialisées à l'origine des phanères) les disposent en ces endroits. Ainsi, si les taches sombres visibles sur le fossile de l'oiseau danois provenaient bien de la mélanine, alors le microscope devait me montrer des mélanosomes cylindriques fossilisés le long des barbes et des barbules.

Impatient, je zoomai sur les plumes fossiles et observai aussitôt des millions de structures de forme cylindrique ! Malheureusement, comme une ligne du métro de Copenhague passe à moins de 50 mètres du sous-sol où est installé le microscope électronique du musée, les vibrations empêchaient l'obtention d'images bien nettes. Elles l'étaient toutefois assez pour que l'on distingue des cylindres. J'envoyai immédiatement mes prises de vue à Derek Briggs, mon directeur de thèse à Yale. Ce pionnier de l'étude des fossiles bien conservés me répondit avec moins d'enthousiasme que je ne l'espérais. Il me déclara que ces structures étaient bien connues : depuis des décennies, lui-même et d'autres chercheurs en découvraient dans les plumes et les poils fossiles et ils les identifiaient à des bactéries.

Je continuais cependant à penser que les structures cylindriques en question étaient bien

portèrent et Derek Briggs commença à s'habituer à l'idée. Il ne se laissa toutefois convaincre définitivement qu'après la confirmation par Richard Prum de la très exacte ressemblance de mes structures à des mélanosomes.

UN DEUXIÈME EXEMPLE POUR CONVAINCRE

Pour s'en persuader complètement, Derek Briggs voulait un autre exemple. Il fouilla dans la littérature scientifique et trouva la description d'une petite plume vieille de 108 millions d'années découverte au Brésil. Ce fossile comportait des bandes de couleurs noires et blanches distinctes (voir l'illustration page 63). Étant donné que la coloration blanche résulte d'une absence de pigments, Derek Briggs pensait que si nous pouvions montrer que ce spécimen contenait des mélanosomes alignés uniquement dans les bandes noires, nous aurions assez d'éléments pour défendre notre point de vue.

Après avoir obtenu le prêt du spécimen brésilien, nous avons placé sous le microscope électronique le bloc entier dans lequel il se trouvait. J'ai alors vu, dans les bandes noires de cette plume, des milliers de petits mélanosomes alignés le long des axes des barbes et barbules. L'examen des bandes blanches, en revanche, n'a révélé que la matrice rocheuse, c'est-à-dire exactement ce que l'on pouvait attendre en l'absence de pigment.

Depuis la publication de ces résultats, en 2008, mon équipe et plusieurs autres ont décrit la découverte de mélanosomes et d'autres pigments dans divers fossiles. Des chercheurs se sont aussi mis à étudier la chimie de la mélanine fossile et leurs résultats corroborent les observations suggérant que la mélanine peut traverser quasi intacte les millions d'années. Avec Caitlin Colleary, alors étudiante à l'université de Bristol où je travaille aujourd'hui, nous avons montré que les légères altérations apparaissant dans la mélanine fossile sont la conséquence des fortes pression et température régnant dans le sol profond (quelques chercheurs maintiennent encore que les structures observées seraient des bactéries, mais ils sont à court d'arguments).

Notre résultat le plus spectaculaire est la reconstitution de couleurs de plumes de dinosaures. En 2009, mes collègues de Yale et moi nous sommes associés à Matthew Shawkey et Liliana D'Alba, à l'université de Gand en Belgique, et à d'autres chercheurs pour reconstituer les couleurs du plumage d'*Anchiornis huxleyi*. Il s'agit d'un petit dinosaure prédateur qui, il y a environ 155 millions d'années, vivait dans ce qui allait devenir le nord de la Chine. Tout comme l'oiseau provenant du Danemark que j'avais étudié auparavant, le fossile d'*Anchiornis* présentait des taches sombres visibles à l'œil nu, qui suggéraient la présence de matière ➤



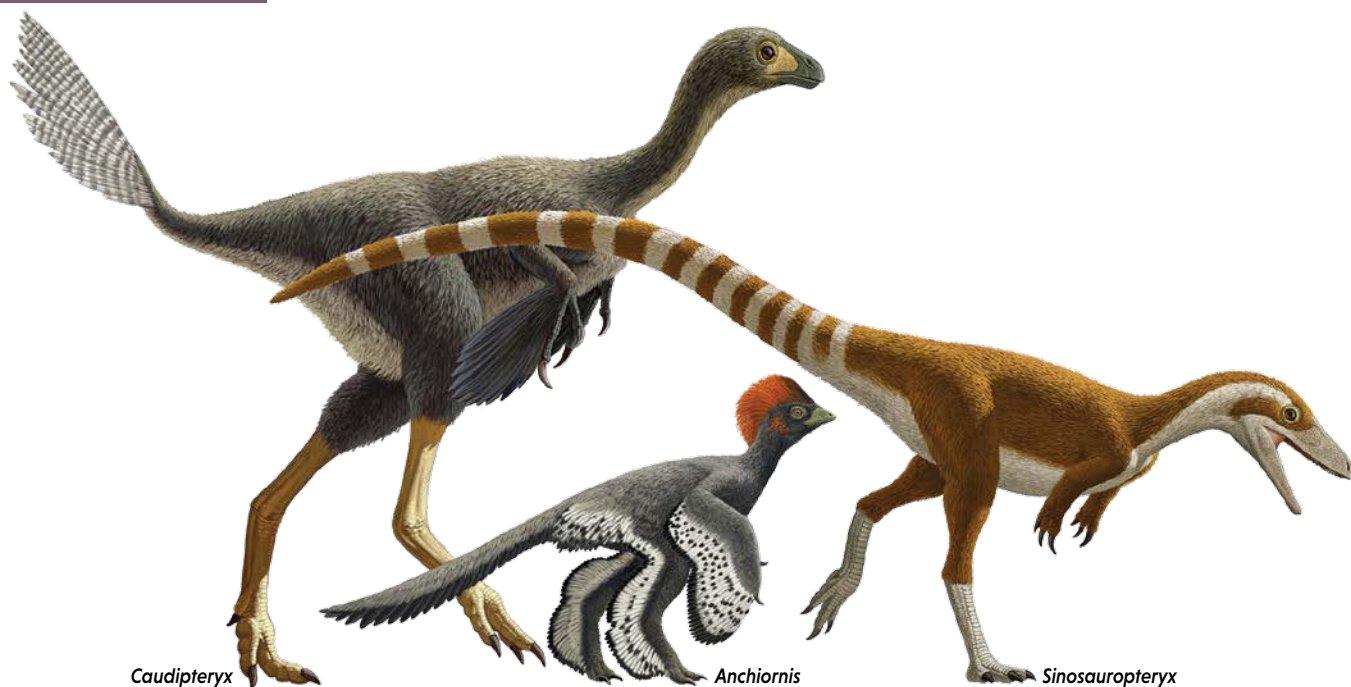
Impatient, je zoomai sur les plumes fossiles et observai aussitôt des millions de structures de forme cylindrique



des mélanosomes fossiles. Je fis part de mes arguments à Derek Briggs : d'une part, ces structures ont la bonne taille et la bonne forme ; d'autre part, leur orientation dans la structure des plumes est identique à celles des mélanosomes noirs dans les plumes actuelles ; enfin, le cas de l'encre de calmar fossile prouvait que la mélanine peut se fossiliser. Ces arguments

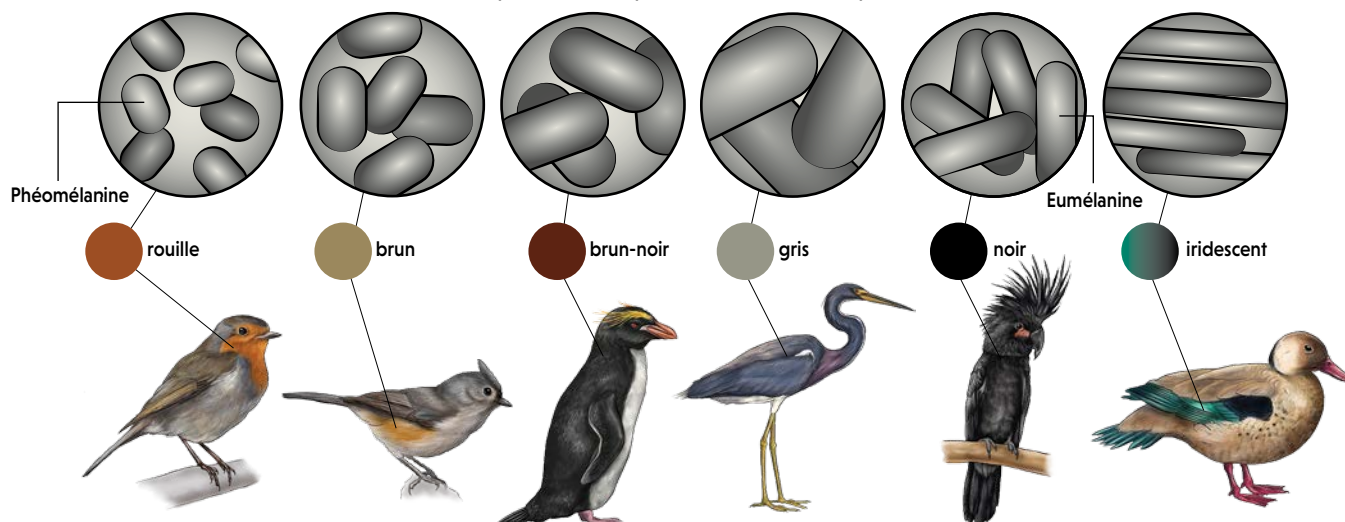
DES COULEURS VIVANTES

Les mélanosomes, des organites cellulaires porteurs de pigments, peuvent se conserver dans les fossiles pendant des dizaines de millions d'années. En étudiant la nature des pigments et leur disposition, les chercheurs ont reconstitué les couleurs de nombreux animaux, dont des dinosaures. Ces avancées révèlent pour la première fois l'apparence réelle de ces animaux et laissent entrevoir certains aspects de leur mode de vie, tels que leurs périodes d'activité (diurne ou nocturne) et le type de milieu qui les abritait.



DÉTERMINER LA COULEUR D'APRÈS LA FORME, LA TAILLE ET LA RÉPARTITION DES MÉLANOSOMES

Les deux formes de mélanine donnent lieu à des couleurs différentes: l'eumélanine est associée aux tons noirs tandis que la phéomélanine correspond aux teintes rouge-roux. Les combinaisons de ces formes de mélanine et de l'absence de pigment produisent les couleurs brune, grise et blanche. Les reflets irisés de certains plumages sont produits par des structures constituées d'empilements plus ou moins réguliers de mélanosomes, qui diffractent la lumière. L'étude des mélanosomes et de leur répartition dans les plumes des oiseaux actuels a fourni aux chercheurs des données de référence, à partir desquelles ils peuvent déterminer les couleurs vraisemblables de zones du corps d'animaux disparus et les motifs colorés que ces derniers arboraient.

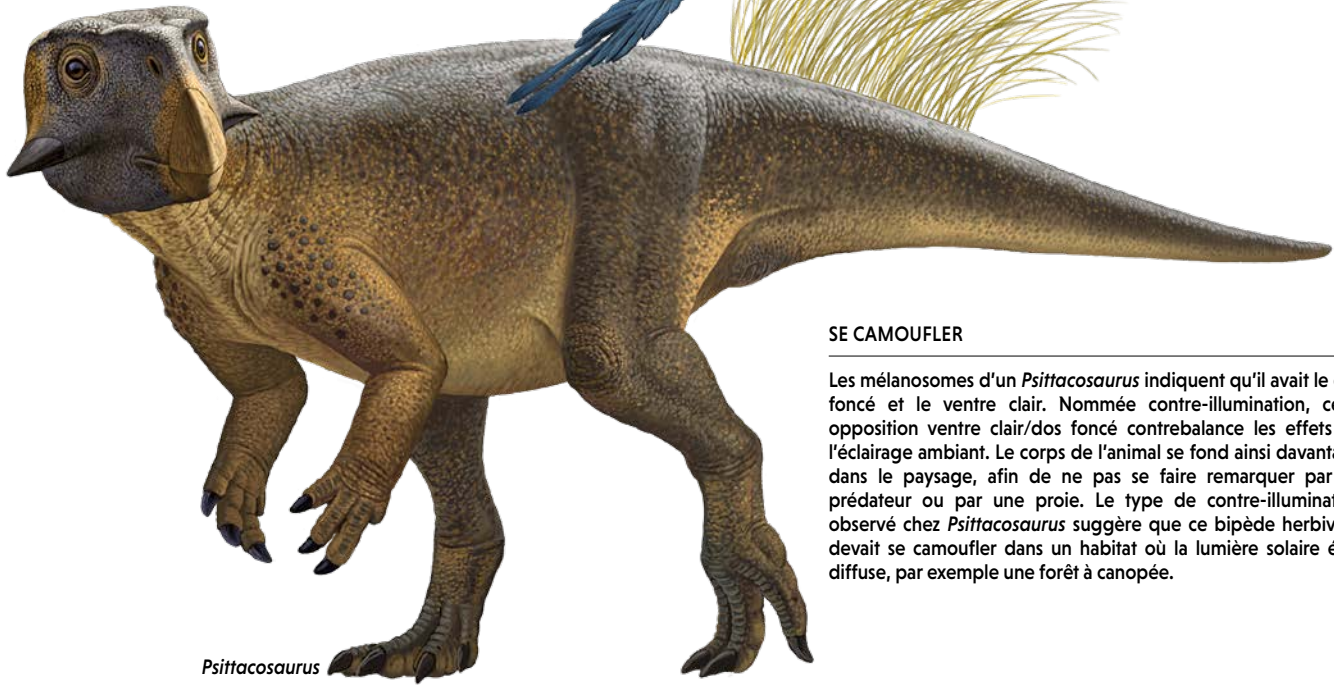


SORTIR DU LOT

La microstructure formée par les mélanosomes du petit dinosaure *Microraptor* révèle que son plumage était semblable à celui d'un corbeau, c'est-à-dire d'un beau noir chatoyant. Les paléontologues pensaient que *Microraptor* était nocturne, étant donné les grandes orbites de ses yeux. Or les oiseaux actuels parés d'un plumage iridescent tendent à être actifs pendant la journée, ce qui suggère que, comme eux, *Microraptor* était diurne.



Microraptor



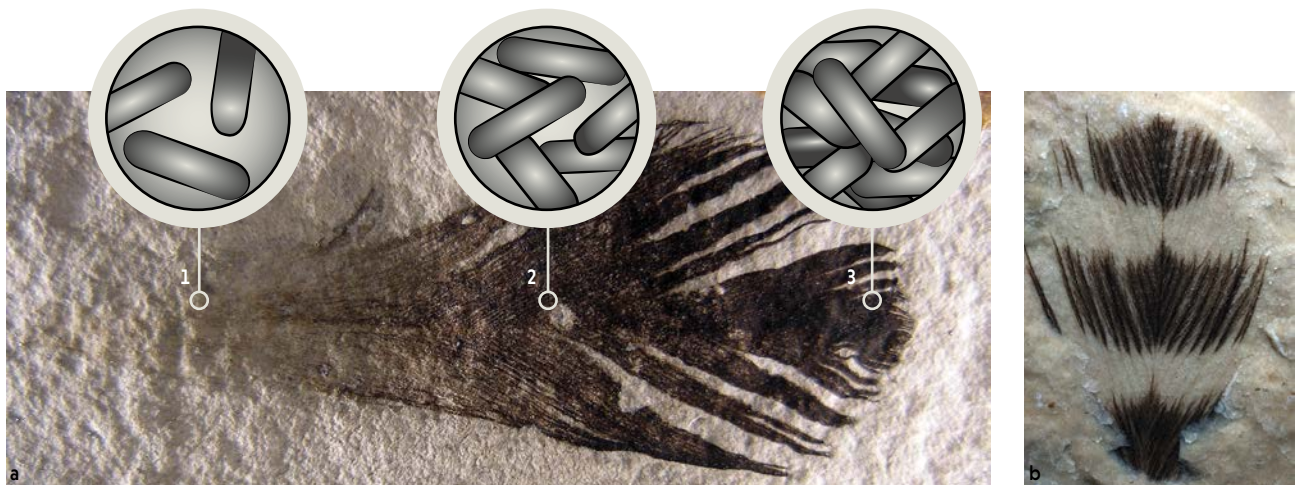
Psittacosaurus

SE CAMOUFLER

Les mélanosomes d'un *Psittacosaurus* indiquent qu'il avait le dos foncé et le ventre clair. Nommée contre-illumination, cette opposition ventre clair/dos foncé contrebalance les effets de l'éclairage ambiant. Le corps de l'animal se fond ainsi davantage dans le paysage, afin de ne pas se faire remarquer par un prédateur ou par une proie. Le type de contre-illumination observé chez *Psittacosaurus* suggère que ce bipède herbivore devait se camoufler dans un habitat où la lumière solaire était diffuse, par exemple une forêt à canopée.

RESTITUER LE MOTIF COLORÉ D'APRÈS LA DENSITÉ ET LA RÉPARTITION DES MÉLANOSOMES

Des plumes fossiles illustrent la façon dont des variations dans la concentration en mélanosomes créent des motifs. Les dégradés observés dans un spécimen fossile datant de 55 millions d'années découverts au Danemark (a) résultent d'une combinaison de faibles concentrations (couleurs pâles, 1), de concentrations intermédiaires (tons plus soutenus, 2) et de concentrations élevées (couleurs intenses, 3). Dans un autre cas, celui d'un fossile vieux de 108 millions d'années découvert au Brésil (b), des alternances de zones denses en mélanosomes et de zones où ils sont absents produisaient une plume à bandes noires et blanches.



> organique, probablement de la mélanine. Toutefois, nous avions l'intention de reconstituer tout le motif de son plumage – une tâche beaucoup plus ambitieuse qu'établir simplement la présence ou l'absence de mélanosomes. Nous ne pouvions donc pas nous contenter d'étudier ces taches. Il nous fallait mettre au point une façon de prédire les couleurs à partir de la forme des mélanosomes. Pour ce faire, nous avons étudié les mélanosomes de 12 plumes noires, de 12 plumes brunes et de 12 plumes grises d'oiseaux d'aujourd'hui. Nous avons pris en compte le rapport longueur/largeur et l'aspect des mélanosomes, ainsi que la variabilité de leur forme, afin de prédire la couleur de la plume. Grâce à une méthode statistique, l'«analyse discriminante quadratique», nous avons obtenu des prédictions ayant une probabilité de 90 % d'être justes.

ANCHIORNIS : UNE CRÊTE ROUGEÂTRE

Dans le cas d'*Anchiornis*, cette approche a produit des résultats frappants. Nos calculs statistiques suggèrent que la plupart des plumes couvrant le corps de cet animal étaient grises. En revanche, les longues plumes couvrant ses bras et ses pattes n'étaient pas colorées par des mélanosomes sauf aux extrémités, où leur dense présence produisait une couleur noire (comme les extrémités des ailes de nombreux oiseaux modernes). La mélanine ne fait pas que colorer les plumes : elle les renforce mécaniquement aussi, ce dont *Anchiornis* bénéficiait sans doute aussi. De façon très surprenante, les plumes du haut de sa tête contenaient des empreintes de mélanosomes globulaires, de sorte qu'*Anchiornis* devait avoir une crête rougeâtre. Ce dinosaure devait avoir fière allure !

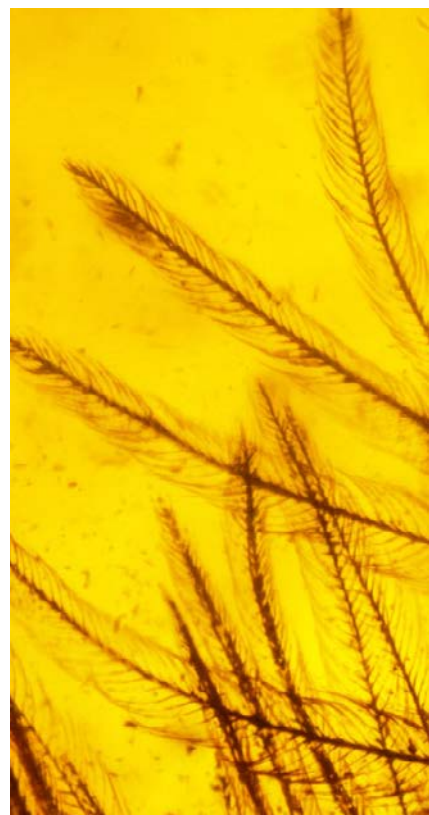
À peu près à la même époque où nous avons publié notre étude sur *Anchiornis*, Fucheng Zhang, de l'Institut de paléontologie des vertébrés de l'Académie chinoise des sciences, Michael Benton, de l'université de Bristol, et leurs collègues ont annoncé la découverte de mélanosomes dans toute une série d'oiseaux et de dinosaures fossilisés dans des roches chinoises datant de 130 millions d'années. La répartition des mélanosomes globulaires chez *Sinosauropteryx*, un dinosaure couvert de duvet, impliquait que ce dernier arborait une robe rousse et une queue striée comme celles d'un tigre. Le premier dinosaure roux connu !

Depuis cette époque pionnière, nos données se sont multipliées jusqu'à comprendre aujourd'hui des centaines d'échantillons. Certains d'entre eux nous permettent d'affirmer avec certitude la présence d'iridescence, c'est-à-dire des reflets métalliques comme ceux qui caractérisent par exemple les plumages des colibris et des paons. Les mélanosomes responsables de cet effet ont tendance à être plus

longs que les mélanosomes typiques et peuvent être creux ou aplatis. L'iridescence résulte d'empilements particuliers des mélanosomes, lesquels diffractent la lumière de diverses façons, ce qui produit différentes couleurs suivant l'angle de vue ou l'éclairage.

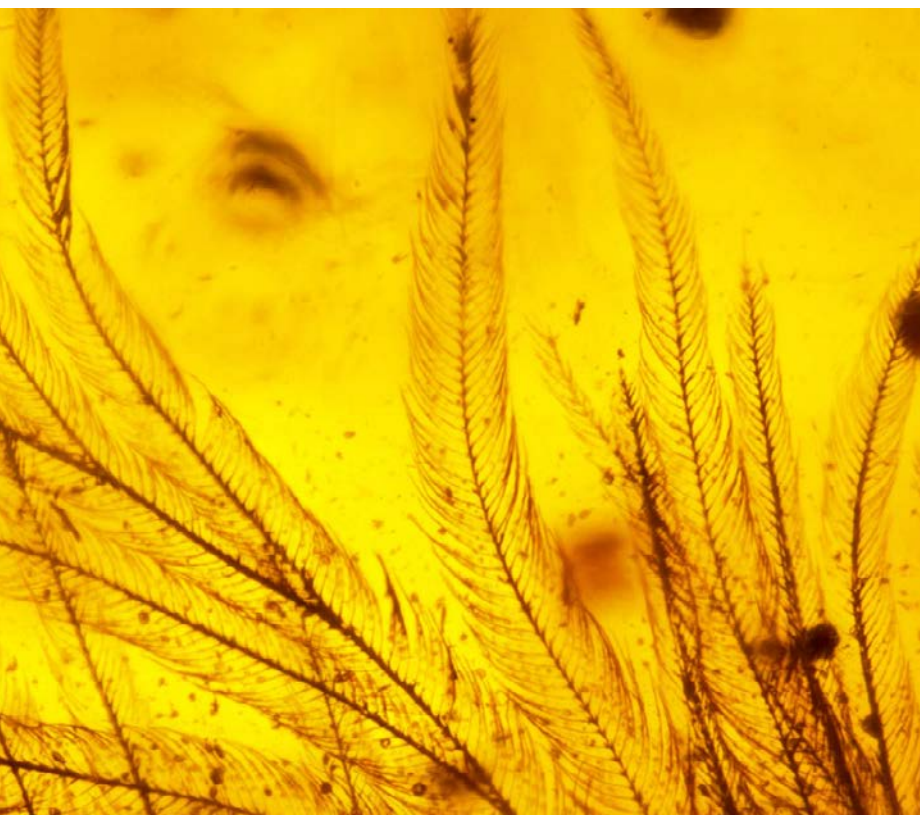
En 2009, nous avons trouvé des preuves de cette iridescence dans une plume fossile, datant de 49 millions d'années, mise au jour dans la carrière de Messel, en Allemagne. Ce fossile conservé au Muséum Senckenberg, à Francfort, présente une iridescence encore perceptible, car il a conservé la disposition initiale des mélanosomes. Ces derniers sont disposés en une couche dense et lisse se trouvant dans les fines entretoises de la plume, c'est-à-dire les barbuies. Ils ne sont présents que sur le bord le plus externe de la plume et sur le dessus, c'est-à-dire seulement sur les parties non recouvertes par les autres plumes. La disposition des mélanosomes produit ce que l'on nomme en optique une couche mince, structure qui crée des interférences, donc une iridescence (une mince couche d'huile flottant sur l'eau produit le même effet). Nous en avons déduit que les extrémités des plumes étaient iridescentes.

Il n'a pas fallu longtemps pour que nous découvriions à nouveau de l'iridescence, chez



Le motif suggéré par des traces était subtil : il comportait de fines marbrures, des points et des traits

un véritable dinosaure cette fois : *Microraptor*. De la taille d'un corbeau, ce petit prédateur avait la particularité de posséder quatre ailes, ou plutôt quatre membres en forme d'ailes. Il s'agit d'un cousin primitif de *Velociraptor*, rendu célèbre par le film *Jurassic Park*, où il est représenté avec une peau à écailles. Aujourd'hui, on sait que *Microraptor* et *Velociraptor* étaient en fait couverts de plumes. Celles de *Microraptor* contenaient de longs mélanosomes cylindriques disposés de telle façon qu'ils



PLUMES DE DINOSAURES

Celles-ci proviennent de la queue d'un petit dinosaure non avien découverte dans un bloc d'ambre birman. Elles comportaient un rachis (tige centrale), ainsi que des barbes (branches) et des barbules (rameaux) imbriquées.

diffraquent la lumière. Son plumage devait donc être noir, mais avec le même type de reflets que celui du corbeau.

Récemment, Jennifer Peteya, de l'université d'Akron dans l'Ohio, et Matthew Shawkey ont découvert la même iridescence chez *Bohaiornis*, un oiseau de Chine du groupe des énantionithes, qui était doté d'une longue queue formée de deux plumes.

DU PLUMAGE AU COMPORTEMENT

Les pigments fossiles ont aussi l'intérêt de révéler des facettes auparavant inconnues de la vie quotidienne des dinosaures et d'autres animaux disparus depuis longtemps. En raison de la très grande taille de ses orbites, les paléontologues pensaient par exemple que *Microraptor* était nocturne. La découverte de son plumage iridescent suggère qu'il était en fait diurne, car ce type de coloration se rencontre aujourd'hui généralement chez des espèces actives durant la journée. Quant aux couleurs vives d'*Anchiornis*, elles permettaient probablement d'attirer un partenaire ou jouaient un rôle dans la parade nuptiale, comme les ramages parfois si criards des oiseaux modernes. La restitution des plumages de dinosaures pourrait ainsi nous fournir les moyens de tester nos hypothèses sur leurs comportements.

Les mélanosomes fossiles peuvent aussi nous aider à préciser dans quel type d'environnement une forme de vie disparue vivait. Nous

avons mené notre premier essai en ce sens grâce à un splendide fossile de *Psittacosaurus*, un petit dinosaure végétarien apparenté au célèbre *Triceratops*. Assez fréquents dans le nord-est de la Chine, les squelettes de cette espèce sont souvent très complets. Le spécimen que nous avons étudié sort du lot cependant, puisqu'il est entouré d'un mince film : les vestiges d'une peau et de délicates écailles. Sa queue présente de longues soies filamenteuses, qui pourraient être des précurseurs de plumes. Toutes les découvertes précédentes de plumes concernaient des dinosaures principalement carnivores – des théropodes. *Psittacosaurus* appartient, lui, à un groupe de dinosaures herbivores : les cératopsiens. C'est peut-être un indice que le plumage était bien plus répandu chez les dinosaures qu'on ne le pensait.

Lors de ma première observation de ce spécimen en 2009, soit un an après l'annonce de la découverte de mélanosomes dans des oiseaux fossiles, j'ai vu d'emblée des indices de la présence d'un magnifique motif coloré sur tout le corps. Il était subtil, puisqu'il comportait de fines marbrures, des points et des traits. J'ai aussi pu constater que l'animal avait le dos sombre et le ventre pâle. L'opposition de ton entre le dos et le ventre contrebalance l'ombre créée sur l'animal par l'éclairage ambiant, ce qui a pour effet de le rendre moins visible dans le paysage. Nommée contre-illumination, cette forme de camouflage se rencontre aujourd'hui chez de nombreux animaux, depuis les dauphins jusqu'aux cerfs en passant par les antilopes et les requins.

Quand j'ai montré le motif de la robe de *Psittacosaurus* à Innes Cuthill, dont l'équipe étudie le camouflage animal à l'université de Bristol, nous avons compris qu'il y avait là l'occasion d'étudier la contre-illumination chez un dinosaure et d'en déduire le type de milieu où il vivait.

Pour reconstituer l'habitat d'un animal, les chercheurs réunissent généralement des indices fournis par les fossiles d'autres animaux et de végétaux découverts à proximité. Ce type d'approche est problématique, car, souvent, le milieu où un fossile est découvert ne correspond pas à celui où l'organisme vivait. Le psittacosure chinois, par exemple, a été retrouvé dans les sédiments d'un ancien lac, alors que ce dinosaure ne semble pas avoir été aquatique.

Récemment, Innes Cuthill et ses collaborateurs ont étudié la contre-illumination chez les ongulés actuels (chevaux, antilopes, chameaux, sangliers, rhinocéros...). Le camouflage par contre-illumination implique une coloration plus sombre sur le haut du corps que sur le bas, mais le contraste des deux tons et la nature de la transition diffèrent d'une espèce à l'autre. L'équipe d'Innes Cuthill a étudié la contre-illumination chez les ongulés pour ➤

> essayer de mettre en évidence si la variation de ton qui produit ce camouflage est corrélée aux conditions de luminosité, lesquelles varient avec la latitude et la densité de végétation. Or ses résultats vont dans ce sens.

De façon générale, dans un milieu ouvert, la lumière solaire directe tend à créer une ombre qui monte haut sur le corps, avec une transition bien nette vers la zone du corps illuminée. Les animaux vivant dans un tel habitat présentent en général une contre-illumination adaptée: le dos est sombre et le cède brusquement à un ventre clair, donc sans zone de coloration intermédiaire. L'antilope d'Amérique (*Antilocapra americana*) est un cas typique de ce genre de contre-illumination. Dans les habitats fermés, en revanche, de la lumière diffuse à travers la végétation et se disperse dans toutes les directions, ce qui produit une ombre moins haute sur le corps, accompagnée d'une transition douce vers la zone éclairée. Les animaux de ce genre d'habitat tendent à présenter une contre-illumination où la transition du ventre clair au dos plus sombre est progressive, ce qui est le cas par exemple des cerfs à queue noire (*Odocoileus hemionus*) et à queue blanche (*O. virginianus*), communs dans les forêts nord-américaines.

CAMOUFLAGE PAR CONTRE-ILLUMINATION

Le simple examen visuel du spécimen de *Psittacosaurus* révélait un certain type de contre-illumination, mais lequel? Pour le déterminer avec plus de précision, nous avons cartographié la répartition de la mélanine conservée sur le fossile à l'aide d'une technique d'imagerie spéciale. Avec le concours du paléoartiste britannique Bob Nicholls, nous avons ensuite projeté la carte obtenue sur un modèle précis et en grandeur nature du dinosaure. Nous avons ainsi établi que la transition du foncé au clair se situait bas sur le ventre et la queue de *Psittacosaurus*.

Afin de préciser la fonction exacte de ce camouflage par contre-illumination, nous avons photographié les ombres formées sur une copie peinte en grise de notre modèle grandeur nature dans toute une série de conditions d'éclairage, du soleil le plus éclatant jusqu'au ciel plombé de nuages, et cela tant sous des conifères qu'en terrain dégagé. Nous avons ensuite inversé les nuances sombres et claires des photographies afin de définir les contre-illuminations adaptées à telle ou telle condition. De cette façon, nous sommes parvenus à la conclusion que le type de contre-illumination de *Psittacosaurus* était adapté à un milieu baigné par une lumière diffuse: une forêt à canopée par exemple.

Enfin, les pigments conservés dans les proies probables de certains dinosaures peuvent aussi nous renseigner sur eux. Chez les insectes, la plupart des motifs colorés sont en effet

apparus au cours de l'évolution afin de leur éviter d'être dévorés. Or les fossiles des névroptères, un grand groupe d'insectes prédateurs généralistes, en offrent un exemple fascinant. Il y a entre 170 et 150 millions d'années, les ailes de certains névroptères ont commencé à arborer des ocelles, c'est-à-dire des taches en forme d'yeux, susceptibles d'intimider un prédateur approchant très vite. Ces insectes ont été parmi les premiers à acquérir de tels caractères.

Contre quel type de prédateurs se défendaient-ils? La plupart des motifs colorés des insectes actuels sont destinés à tromper les oiseaux, leurs principaux prédateurs. Toutefois, les névroptères sont antérieurs aux oiseaux tels que nous les connaissons. On pense donc que leurs prédateurs étaient des paraviens, c'est-à-dire des membres du groupe (Paraves) de dinosaures théropodes contemporains des névroptères, qui allait donner les oiseaux (entre autres). Le registre fossile des paraviens n'indique pas clairement à quel moment la capacité de voler est apparue, mais l'apparition d'ocelles chez les névroptères constitue un indice qu'une intense pression de prédation s'est exercée sur eux, celle-ci étant probablement due à des animaux volants. Les ocelles des insectes nous renseignent donc sur la date d'apparition du vol chez les dinosaures.

La recherche sur les paléocouleurs est loin d'être close. Il reste des pigments à rechercher et à identifier dans les fossiles, notamment les caroténoïdes qui produisent les rouges et des jaunes vifs et les porphyrines qui donnent des tons verts, rouges et bleus. Occasionnellement, de tels pigments ont été découverts dans certains fossiles – notamment des caroténoïdes dans des bactéries fossiles vieilles de plusieurs milliards d'années et des porphyrines dans un moustique gorgé de sang vieux de 46 millions d'années, ou encore dans les œufs d'un oviraptorosaure datant de 66 millions d'années. Des pigments inconnus chez les organismes actuels ont aussi été découverts au sein d'organismes bien plus anciens.

Il est clair que nous finirons par nous heurter à des limites, puisque après des millions d'années de fossilisation, une partie de l'information est irrémédiablement perdue. Nous avons aussi une forte contrainte: les fossiles exceptionnels, dans lesquels le matériau organique est conservé, sont si rares et si précieux qu'il est hors de question de les détruire en y prélevant trop d'échantillons. Cependant, comme les techniques progressent, les découvertes qu'elles rendent possibles vont sans aucun doute changer notre vision du passé de plus en plus vite. Chacune de ces découvertes nous rapprochera du moment où nous verrons les dinosaures ou d'autres animaux éteints tels qu'ils étaient réellement: en couleurs! ■

BIBLIOGRAPHIE

J. Vinther et al., **3D camouflage in an Ornithischian dinosaur**, *Current Biology*, vol. 26(18), pp. 2456-2462, 2016.

J. Vinther et al., **The colour of fossil feathers**, *Biology Letters*, vol. 4(5), pp. 522-525, 2008.

EXPO

VALERIAN ET LAURELINE

en mission pour la Cité

cité
des sciences &
de l'industrie

13 JUIN 2017
14 JANVIER 2018

M PORTE DE LA VILLETTE

#ExpoValerian



ICI L'AFFICHE
AUGMENTÉE



AVEC LE SOUTIEN DE



BNP PARIBAS

EN COLLABORATION AVEC

DARGAUD

EN PARTENARIAT AVEC

MY TFI

Syfy

CNEWS Matin

SCIENCE

