

qu'elles semblaient aussi être là où l'on trouve de telles cellules... C'est alors qu'il me lança le défi qui, aujourd'hui encore, inspire mes recherches : « Eh bien, prouvez-moi qu'il ne s'agit pas de cellules sanguines ! » Si je n'y parviens pas, il faudra alors bien admettre que c'en sont.

Depuis, mes collègues et moi avons retrouvé dans plusieurs spécimens divers restes organiques : vaisseaux sanguins, cellules osseuses, fragments du tissu corné qui constituait les griffes, etc. La préservation de tissus mous au cours de la fossilisation est certes très rare, mais ce phénomène ne s'est pas non plus produit qu'une seule fois.

Ces découvertes contredisent les descriptions classiques de la fossilisation. En outre, elles ouvrent de nouvelles perspectives sur la biologie des animaux disparus. Par exemple, on a déduit de résidus organiques trouvés dans les ossements d'un autre *Tyrannosaurus rex* qu'il s'agissait d'une femelle qui, juste avant de mourir, allait pondre. Et une protéine détectée dans des résidus fibreux retrouvés près d'un petit dinosaure carnivore exhumé en Mongolie a permis d'établir que l'animal avait des plumes qui, sur le plan moléculaire, étaient proches de celles des oiseaux actuels.

Un scepticisme tenace

Nos résultats ont soulevé beaucoup de scepticisme chez les paléontologues, car, après tout, ils sont extrêmement surprenants. Mais le scepticisme est chose normale en science, et je continue à trouver fascinants et prometteurs les travaux sur les tissus mous fossilisés. L'étude des molécules organiques provenant des dinosaures nous permettrait de mieux comprendre l'évolution et l'extinction de ces remarquables animaux, ce que l'on ne pouvait imaginer il y a 20 ans.

Des découvertes extraordinaires exigent des preuves extraordinaires. Avant d'accepter un résultat, un chercheur prudent doit tout faire pour le réfuter. C'est pourquoi, au cours des 20 dernières années, j'ai effectué toutes les expériences imaginables pour essayer de montrer que nos trouvailles n'étaient pas des composants de tissus mous de dinosaures ou d'autres créatures éteintes.

Dans le cas des microstructures rouges observées dans de l'os de *Tyrannosau-*

rus rex, j'ai d'abord pensé que si ces résidus étaient vraiment ceux d'un tissu vasculaire, ils ne pouvaient avoir subsisté, sous une forme sans doute très altérée, que si les os eux-mêmes étaient exceptionnellement bien conservés... Ce genre de tissu mou devait avoir disparu des squelettes mal préservés. MOR 555, notre spécimen de *T. rex* du Montana, est presque complet et ses os sont exceptionnellement bien conservés.

De fait, l'examen au microscope de lamelles d'os des membres a confirmé cette bonne conservation. La plupart des canaux des vaisseaux sanguins présents dans l'os

dense sont vides ; ils ne sont pas remplis de dépôts minéraux comme c'est généralement le cas dans les fossiles. Et nos microstructures rouge rubis n'apparaissent que dans les vaisseaux, et jamais en dehors.

Ensuite, je me suis concentrée sur la composition chimique de ces petites structures rouges. Les analyses ont montré qu'elles sont riches en fer, comme il se doit pour des globules rouges, et que le fer caractérise ces structures, mais pas leurs voisins. Ainsi, la composition en éléments de ces petites choses rondes et rouges diffère de celle des os et des sédiments entourant le fossile.

LA FOSSILISATION

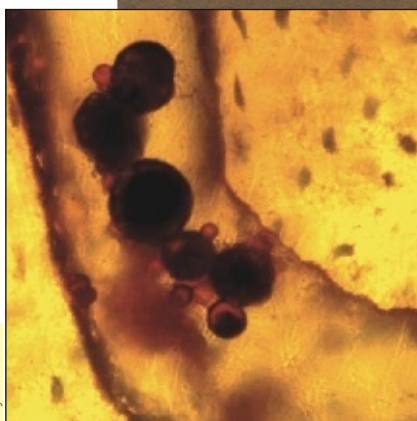
La fossilisation d'un animal commence par une dégradation de la peau, des muscles, des intestins et des tendons, qui détachent des os. Les cellules, les protéines et les vaisseaux sanguins constituant l'os se dégradent aussi. Puis des minéraux du sol s'infiltrent dans les espaces libérés et finissent par former un composite solide avec les minéraux de l'os original.

Toutefois, cette conception classique de la fossilisation doit être nuancée depuis que des cellules, des protéines et des tissus mous ont été découverts dans les os de certains fossiles de dinosaures.

Pour le moment, les chercheurs ne comprennent pas précisément comment des molécules organiques peuvent se conserver pendant des millions d'années, mais ils ont identifié plusieurs facteurs qui favorisent la préservation et la découverte de tels restes.

Mort

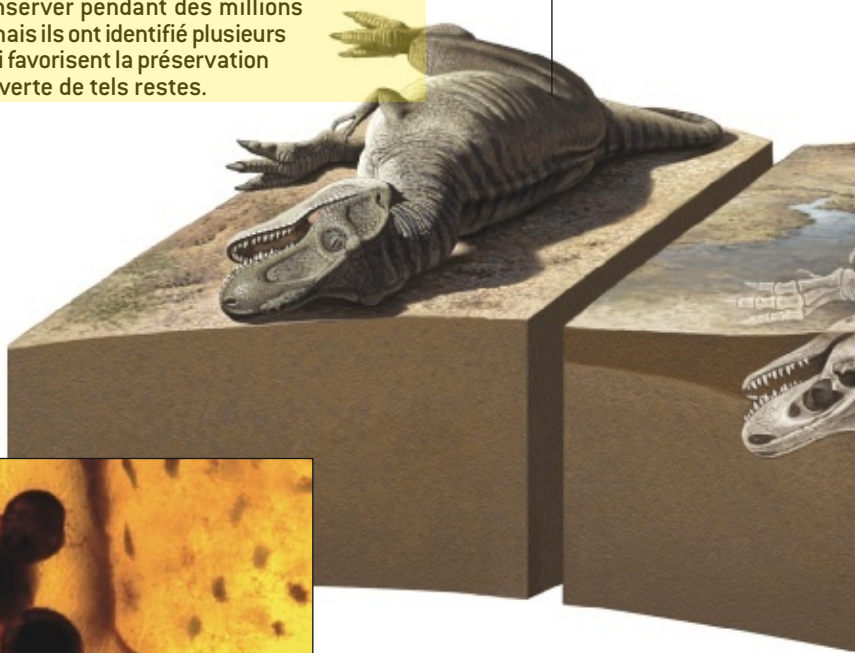
L'animal meurt à l'abri des charognards et autres animaux nécrophages.



Mary H. Schweitzer

Les globules rouges de MOR 555.

Ces petites sphères rouges, situées dans ce qui ressemble à un vaisseau capillaire, sont visibles au microscope dans une coupe mince d'os d'un *Tyrannosaurus rex* du Montana.



Pour pousser plus loin mon enquête sur le lien entre les petites particules rondes et les globules rouges, j'ai tenté de trouver l'hème, la molécule riche en fer qui confère aux protéines de l'hémoglobine la capacité de transporter l'oxygène et qui donne au sang sa couleur écarlate.

Recherche d'anticorps

Pour ce faire, nous avons utilisé le fait que l'hème vibre et absorbe un rayonnement électromagnétique approprié suivant un motif caractéristique, et aussi qu'il absorbe la lumière de façon particulière parce

que son centre est métallique. Ces tests ont montré que dans le matériau sont présents des composés ayant les mêmes signatures spectroscopiques et optiques que l'hème.

L'une des expériences les plus convaincantes que nous ayons menées tirait profit de la réponse immunitaire. Lorsqu'un organisme détecte des substances organiques étrangères, il produit des anticorps. En injectant des extraits d'os du tyrannosaure à des souris, nous avons déclenché la fabrication d'anticorps dirigés contre les composés organiques contenus dans les os. Et quand nous avons ensuite exposé ces anticorps à de l'hémoglobine

de rat et de dinde, nous avons constaté qu'ils s'y liaient : on en déduit que les os de MOR 555 contiennent une substance très proche de l'hémoglobine des animaux d'aujourd'hui.

Aucun des nombreux tests chimiques et immunologiques effectués n'a contredit l'hypothèse que nos sphères étaient des globules rouges de *T. rex*. Pour autant, nous n'avons pu montrer que la substance proche de l'hémoglobine trouvée dans l'os de notre tyrannosaure provenait bien des petites sphères, les techniques disponibles ne permettant pas de déterminer le lieu d'origine d'une substance. C'est pourquoi

Ensevelissement

Les sédiments recouvrent la carcasse avant que des animaux ou l'érosion ne la détruisent ; de telles circonstances se produisent par exemple quand les eaux chargées en sédiments d'une rivière en crue recouvrent une plaine.

Le sable charrié, en particulier, semble empêcher la disparition complète des chairs d'une carcasse, peut-être parce que sa porosité favorise l'évacuation des fluides corrosifs issus de la décomposition des tissus organiques.

Enfouissement profond

Les sédiments qui s'accumulent pendant des millions d'années enfouissent la carcasse en profondeur, et des minéraux dissous dans l'eau du sol s'infiltrent dans les os.

Un enfouissement particulièrement profond peut favoriser la conservation des tissus mous en les protégeant de l'oxydation, des variations thermiques et de l'acidité du sol, ainsi que des ultraviolets, qui sont autant de facteurs actifs en surface. La carcasse finit par se retrouver en équilibre thermique et chimique avec le sol.

Mise au jour

Les mouvements tectoniques soulèvent les couches sédimentaires contenant les fossiles, puis l'érosion expose ces derniers et les met à portée des chasseurs de fossiles.

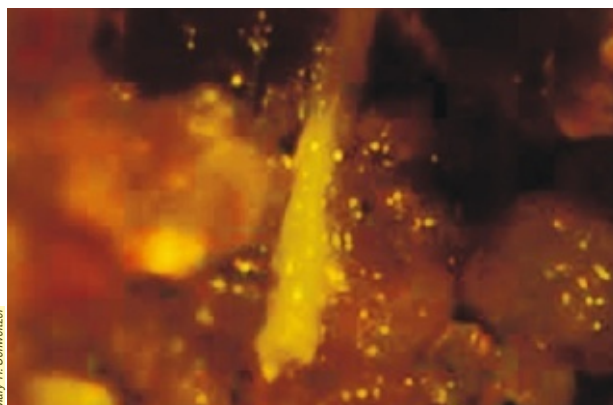
Afin de protéger d'éventuelles molécules organiques résiduelles, il importe alors de minimiser l'exposition du fossile à l'air libre, puis d'analyser aussi vite que possible les matériaux, éventuellement organiques, encore présents sur les os.



Les chercheurs ont retrouvé des tissus mous dans nombre de fossiles vieux de plusieurs dizaines de millions d'années.



L'os d'un doigt de *Rahonavis ostromi*, oiseau qui vécut il y a environ 70 à 80 millions d'années à Madagascar, est recouvert par de la substance blanche. Cette dernière semble être le résidu d'une enveloppe protéique qui recouvrait les griffes de cet animal.



Ce filament creux (au centre) a l'apparence d'une fibre de plume ; il appartenait à *Shuvuuia deserti*, un petit dinosaure carnivore qui peuplait la Mongolie, il y a 70 millions à 83 millions d'années.

nous sommes restés très prudents en publiant nos conclusions en 1997 ; nous nous sommes contenté d'affirmer qu'une substance proche de l'hémoglobine semblait avoir été préservée malgré la fossilisation, et que son origine probable était à chercher au sein des cellules du dinosaure. Notre article n'a eu qu'un très faible écho.

Ces travaux sur l'os de tyrannosaure m'ont fait prendre conscience du potentiel scientifique des restes fossilisés de tissus organiques. Si l'on pouvait récupérer des protéines, nous pourrions remonter à la séquence des acides aminés qui les constituent, tout comme les généticiens séquencent les « lettres » qui forment l'ADN. À l'instar de celles d'ADN, les séquences des protéines contiennent des informations sur les relations de parenté entre espèces, sur l'évolution des espèces et sur la façon dont l'acquisition de nouvelles caractéristiques aurait conféré des avantages aux animaux concernés.

Mais avant d'explorer ces possibilités, il fallait établir que des protéines anciennes avaient persisté dans des fossiles autres que celui de l'exceptionnelle femelle de tyrannosaure que nous avons étudiée. Mark Marshall, Seth Pincus, John Watt et moi nous sommes alors concentrés sur deux fossiles bien conservés qui semblaient prometteurs.

Le premier de ces fossiles était *Rahonavis*, un bel oiseau primitif datant de la fin du Crétacé (il y a 80 à 70 millions d'années) exhumé à Madagascar. Lors de sa mise

au jour, ses découvreurs avaient remarqué la présence, sur les os des doigts, d'un matériau fibreux et blanc. Aucun autre os sur le site ne portait de traces de cette substance, par ailleurs absente dans les sédiments de l'endroit. C'est pourquoi les paléontologues qui fouillaient se sont demandé si cette substance blanche pouvait être apparentée à l'enveloppe dure de kératine qui recouvre les os des doigts des oiseaux actuels et forme leurs griffes. Ils m'ont alors demandé de l'aide.

Kératine de griffes et de plumes

Les kératines pourraient être conservées très longtemps : elles sont abondantes chez les vertébrés et résistent bien à la dégradation. Elles se présentent sous deux formes principales : alpha et bêta. Tous les vertébrés ont de la kératine alpha qui, chez les humains, constitue les cheveux et les ongles et permet à la peau de résister à l'abrasion et à la déshydratation. Quant à la kératine bêta, elle est absente chez les mammifères et n'apparaît, dans les organismes actuels, que chez les oiseaux et les reptiles.

Pour tester la présence de kératine dans le matériau blanc découvert sur les os des doigts de *Rahonavis*, nous avons employé bon nombre des techniques utilisées pour étudier l'os de tyrannosaure. En particulier, les tests d'anticorps ont indiqué la présence de kératine alpha et de kératine

bêta. D'autres analyses ont permis de révéler des acides aminés localisés sur la membrane qui recouvre l'os ; on a aussi détecté de l'azote (un composant des acides aminés) qui était lié à d'autres composés, tout comme les protéines se lient les unes aux autres dans les tissus vivants, y compris dans la kératine. Tous nos tests confirmaient l'idée selon laquelle le mystérieux matériau blanc recouvrant les os des doigts de cet ancien oiseau incluait des fragments de kératine alpha et de kératine bêta et représentait en fait des restes de griffes.

Le second spécimen que nous avons étudié était un fossile spectaculaire de la fin du Crétacé, découvert en Mongolie par des chercheurs du Muséum américain d'histoire naturelle, à New York. Bien que ses découvreurs l'aient nommé *Shuvuuia deserti*, ou « oiseau du désert », il s'agissait en fait d'un petit dinosaure carnivore.

Alors qu'elle nettoyait ce fossile, Amy Davidson, du muséum, remarqua de petites fibres blanches sur la nuque de l'animal. Elle me demanda s'il pouvait s'agir de restes de plumes. Les oiseaux descendent de dinosaures, qui ont eu des plumes bien avant eux. L'idée que *Shuvuuia* possédait un revêtement duveteux était donc plausible. Cependant, je ne m'attendais pas à ce qu'une structure aussi fragile qu'une plume puisse avoir résisté si longtemps. Je me disais que les fibres blanches provenaient plutôt de plantes modernes ou de champignons ; mais j'acceptai d'y regarder de plus près.